



**João Pedro Tomar Pinheiro de Brito**

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

## **Caracterização de betão com terra através de provetes cilíndricos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientadora: Maria Paulina Faria Rodrigues,  
Professora Associada, Faculdade de  
Ciências e Tecnologia da  
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente:	Prof. Doutor Carlos Chastre Rodrigues
Arguente:	Prof. Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho
Vogal:	Profª. Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Junho de 2014**



‘Copyright’ João Pedro Tomar Pinheiro de Brito, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a todos os que me ajudaram directamente na realização desta dissertação:

À Professora Doutora Paulina Faria, orientadora da presente dissertação, pelo interesse que sempre demonstrou e pelo apoio prestado, pela sua total disponibilidade assim como o rigor e exigência que em muito contribuíram para um conhecimento mais aprofundado do tema.

Ao Engenheiro Vítor Silva, bolsheiro da UNL-FCT, por toda a ajuda e orientação prestadas na execução da campanha experimental, para além da sua total disponibilidade e apoio que sempre demonstrou ao longo de todo o trabalho, sempre acompanhados de boa disposição e momentos únicos de convívio e descontração.

À Arquitecta Catarina Pereira pela ajuda e total disponibilidade dada na caracterização da terra utilizada, assim como na realização dos ensaios de condutibilidade térmica e esclerómetro.

À empresa ESLAM pelo fornecimento dos cilindros de betão, que proporcionou a realização deste trabalho.

À Cátia Abreu, companheira de trabalho ao longo da dissertação, e ao Carlos Rodrigues, pela ajuda durante a campanha experimental.

Aos Engenheiros Nuno Gouveia e Micael Inácio, bolsheiros da FCT/UNL pela total disponibilidade, conhecimento transmitido e apoio na realização dos ensaios mecânicos.

Por fim, com esta dissertação encerra-se um longo e árduo percurso académico, mas muito gratificante que influenciará positivamente o meu futuro pessoal e profissional, e com o qual gostaria de agradecer a todos os que para ele contribuíram, em particular:

Aos meus amigos e colegas Carlos Rodrigues, João Carneiro, João Prata, João Valadares, Júlio, Marcos, Orlando, Pedro Barbosa, Rodrigo Freitas e Tiago por todos os grandes momentos de convívio, trabalho e estudo passados durante o curso.

Aos meus amigos de longa data, Joel, Carlos e Pedro Marques pelo constante incentivo e bons momentos passados juntos.

À minha família, nomeadamente aos meus tios e primos, assim como ao meu avô Bento que muito me apoiaram para seguir este caminho.

Aos meus amigos Nuno e Maria José, à minha afilhada Sara que sempre estiveram presentes e muito me ajudaram durante todo o meu percurso académico.

À Rita por todo o apoio e incentivo para a parte final deste trabalho, sem o qual teria sido mais difícil ultrapassar, para além de todos os momentos passados juntos.

Aos meus pais, Rui P.M. Brito e Isabel Maria L.T. Brito, pela oportunidade que me deram de realizar este percurso académico, por nunca terem deixado de acreditar, pela paciência que sempre demonstraram e por todo o apoio e incentivo dado ao longo de toda a minha vida.



## RESUMO

Vive-se num mundo cada vez mais competitivo e para se alcançar o sucesso há que estar sempre a par das exigências e das últimas tendências de mercado. O sector da construção civil tem sofrido nos últimos anos um grande decréscimo da sua produção. Para dar a volta a esta fase, o lançamento de novas soluções construtivas, assente em novos materiais, tem mais do que nunca um papel preponderante. A sustentabilidade tem cada vez mais uma importância maior nos produtos lançados e, é por isso que o caminho da recuperação da construção civil passa obrigatoriamente pelo seu menor impacto ambiental. O tema desta dissertação enquadra-se perfeitamente na sustentabilidade do sector. O projecto QREN “Parede Eco-estrutural” onde está inserida, tem como objectivo o desenvolvimento de uma solução construtiva modular com base em betão para aplicação em edifícios de pequeno porte, em países com grandes necessidades habitacionais, incorporando matérias-primas autóctones.

No caso específico da produção do betão, pretendeu-se avaliar, através da caracterização de provetes cilíndricos, quais as características de um betão com terra, com vista à sua redução da pegada ecológica. Pretende-se avaliar em que medida este betão surge como alternativa aos materiais tradicionais pré-fabricados.

Perante o estudo realizado pode considerar-se que o betão com terra pode constituir uma alternativa viável às soluções de betão de agregado corrente, apresentando bom comportamento físico e mecânico, mantendo os traços de ligante:agregado semelhantes aos utilizados no betão corrente.

**Palavras-Chave:** Betão com terra, sustentabilidade, construção, provete cilíndrico, pré-fabricação





## ABSTRACT

The world is becoming more competitive and in order to reach success, one has to be aware of the demands and the latest market trends. The construction industry had a major downsize on its normal activity in the last few years. In order to overcome this situation, new constructive solutions are needed, based on new construction materials. More than ever before it has a decisive role in this industry. Sustainability is quickly becoming of great importance with the launch of new products, and this is why the road to recovery for the construction industry will necessarily involve a decrease in the environmental impact. This dissertation's theme fits perfectly in the industry sustainability. It is framed on QREN project "Parede Eco-estrutural" which has the purpose of developing modular concrete walls to be applied on small size dwelling in developing countries with high needs of buildings. The use of autochthonous and local raw-materials for the production of concrete, is an aim, in order to increase their sustainability and decrease the environmental footprint.

The specific case of concrete with earth as a building material is assessed, by the characterization of cylindrical earth concrete.

Based on the conducted study, earth concrete seems to be a real alternative to the regular concrete construction, with a good physical and mechanical performance, when maintain the binder:aggregate ratio similar to the one's used in regular concrete.

**Keyword:** Earth concrete, sustainability, construction, cylindrical specimens, prefabrication



# ÍNDICE DE TEXTO

## 1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objectivos e metodologia.....	2
1.3. Organização do texto.....	3

## 2. ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1. A utilização do cimento e betão na construção.....	5
2.1.1. Cimento.....	5
2.1.2. Betão.....	5
2.2. A utilização da terra na construção.....	6
2.3. Utilização de solo-cimento e betão com terra.....	9
2.4. Avaliação das características dos materiais através do ensaio de provetes.....	11
2.4.1. Condutibilidade Térmica.....	12
2.4.2. Ultra-sons.....	12
2.4.3. Dureza superficial.....	17
2.4.4. Permeabilidade à água sob baixa pressão através da utilização de tubos de Karsten....	19
2.4.5. Absorção de água por capilaridade.....	20
2.4.6. Secagem.....	21
2.4.7 Resistência e ensaios mecânicos.....	22

## 3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1. Betões e provetes.....	25
3.1.1. Terra utilizada e composição dos betões.....	25
3.2. Ensaios realizados.....	26
3.2.1. Ensaio de ultra-sons.....	27
3.2.2. Ensaio de condutibilidade térmica.....	30
3.2.3. Ensaio de dureza superficial.....	32
3.2.4. Corte dos cilindros para os ensaios.....	35
3.2.5. Ensaio de absorção de água sob baixa pressão através de tubos de Karsten.....	37

3.2.6. Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	40
3.2.7. Ensaio de secagem.....	45
3.2.8. Ensaio de compressão diametral.....	48
3.2.9. Ensaio de compressão uniaxial.....	52
<b>4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS</b>	
4.1 Comportamento face à acção da água.....	57
4.2 Características mecânicas.....	62
<b>5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b>	
5.1. Conclusões finais.....	67
5.2. Desenvolvimentos Futuros.....	69
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>71</b>
<b>ANEXO: Resultados individuais dos ensaios</b>	<b>75</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Prensa "Cinva-Ram" .....	10
Figura 2.2 – Método directo de propagação de ultra-sons .....	13
Figura 2.3 – Método indirecto de propagação de ultra-sons .....	14
Figura 2.4 – Método semi-directo de propagação de ultra-sons.....	14
Figura 2.5 – Esclerómetro de Schimdt pendular e esclerómetro de Schimdt.....	17
Figura 2.6 – Representação esquemática de tubo de Karsten para superfícies horizontais (esq.) e para superfícies verticais (dir.) .....	20
Figura 2.7 – Relação entre a resistência medida em provetes prismáticos e provetes cúbicos .....	23
Figura 3.1 – Pontos e planos de leitura dos ultra-sons sobre provete (a)) e dos topos (b)) e aparelho de ultra-sons (c)) .....	28
Figura 3.2 – Módulo de elasticidade dinâmico dos betões.....	30
Figura 3.3 – Ensaio de condutibilidade térmica .....	31
Figura 3.4 – Condutibilidade térmica dos betões .....	32
Figura 3.5 – Esclerómetro com provete betão com terra (a)) e com betão padrão (b)); Esclerómetro pendular tipo PT (c)) .....	34
Figura 3.6 – Dureza superficial dos betões .....	35
Figura 3.7 – Provede de betão com terra (mistura B) após corte (a)); Provedes de todas as misturas após corte(b)); Máquina de corte Norton Clipper Jumbo (c)) .....	36
Figura 3.8 – Ensaio tubos de Karsten a decorrer aplicados nos provetes de betão com terra (a)) e betão padrão (b)).....	38
Figura 3.9 – Valores médios e desvios-padrão de absorção de água de todos os provetes .....	39
Figura 3.10 – Coeficiente de absorção de água aos 60 minutos.....	39
Figura 3.11 – Preparação dos cilindros com película polietileno (a)) e com tecido fino (b)) .....	41
Figura 3.12 – Provedes no ensaio de capilaridade (a)); Verificação do nível de água (b)); Pesagem de provede (c)).....	42
Figura 3.13 – Curva de absorção de água por capilaridade.....	43
Figura 3.14 – Coeficiente de capilaridade dos betões .....	44
Figura 3.15 – Valor assintótico dos betões.....	44
Figura 3.16 – Secagem dos provetes de betão com terra (a)),(b)).....	45
Figura 3.17 – Curvas de secagem.....	47
Figura 3.18 – Taxa de secagem dos diferentes betões.....	47

Figura 3.19 – Índice de secagem dos diferentes betões.....	48
Figura 3.20 – Máquina universal ZWICK/ROELL (a)); provete a ensaiar (b)).....	49
Figura 3.21 – Resistência à compressão diametral dos diferentes betões .....	50
Figura 3.22 – Resistência à compressão diametral dos diferentes betões antes e após o ensaio de capilaridade .....	51
Figura 3.23 – Prensa W+B Modelo PKNS 19D (a)), Ensaio de provete de betão com terra (b)); Provete de betão com terra após rotura (c)).....	53
Figura 3.24 – Resistência à compressão uniaxial dos vários betões de 8 cm.....	54
Figura 3.25 – Valores de resistência à compressão uniaxial dos vários provetes de 6 cm.....	55
Figura 4.1 – Índice de secagem e valor assintótico.....	58
Figura 4.2 - Índice de secagem e valor assintótico.....	59
Figura 4.3 – Taxa de secagem e coeficiente de capilaridade.....	60
Figura 4.4 – Taxa de secagem e coeficiente de capilaridade.....	60
Figura 4.5 – Coeficiente de capilaridade e coeficiente de absorção de água aos 60 minutos .....	61
Figura 4.6 - Coeficiente de capilaridade e coeficiente de absorção de água aos 60 minutos .....	62
Figura 4.7 – Resistência à compressão uniaxial e módulo de elasticidade dinâmico.....	63
Figura 4.8 - Resistência à compressão uniaxial e módulo de elasticidade dinâmico .....	63
Figura 4.9 – Dureza superficial e resistência à compressão uniaxial .....	64
Figura 4.10 – Dureza superficial e resistência à compressão uniaxial .....	65

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Descrição das principais soluções construtivas em terra.....	8
Quadro 2.2 – Efeito da temperatura na transmissão do impulso .....	15
Quadro 2.3 – Efeito das dimensões do provete na transmissão do impulso.....	16
 Quadro 3.1 – Designação, dimensão, quantidades dos provetes e data de produção .....	25
Quadro 3.2 – Constituição dos betões .....	26
Quadro 3.3 – Velocidades de propagação dos ultra-sons para todas as misturas.....	29
Quadro 3.4 – Valores do módulo de elasticidade dinâmico dos betões .....	29
Quadro 3.5 – Condutibilidade térmica para todos os betões .....	31
Quadro 3.6 – Tipos de esclerómetro e suas aplicações .....	32
Quadro 3.7 – Valores médios e desvio-padrão da dureza superficial.....	34
Quadro 3.8 – Valores médios e desvios-padrão do volume de água absorvida aos 60 minutos .....	38
Quadro 3.9 – Valores médios e desvios-padrão do coeficiente de capilaridade e valor assintótico .....	43
Quadro 3.10 – Médias e desvios-padrão da taxa de secagem e índice de secagem .....	47
Quadro 3.11 – Médias e desvios-padrão da carga máxima e resistência à tracção por compressão .....	50
Quadro 3.12 – Médias e desvios-padrão da carga máxima com e sem contacto com a água .....	51
Quadro 3.13 – Médias e desvios-padrão da resistência à compressão diametral com e sem contacto com a água.....	51
Quadro 3.14 – Valores médios e desvios-padrão da carga máxima e da resistência à compressão uniaxial dos vários betões de 8 cm.....	53
Quadro 3.15 – Valores médios e desvios-padrão da carga máxima e da resistência à compressão uniaxial dos vários betões de 6 cm.....	54
 Quadro 4.1 – Resultados dos vários ensaios face à acção da água.....	57
Quadro 4.2 – Resultados dos vários ensaios face à acção da água.....	58
Quadro 4.3 – Resultados obtidos para ensaios mecânicos e de resistência .....	62
Quadro 4.4 – Resultados obtidos para ensaios mecânicos e de resistência .....	63
 Quadro A.1 – Resultados individuais das velocidades do ensaio de ultra-sons .....	77
Quadro A.2 – Resultados individuais de condutibilidade térmica .....	78
Quadro A.3 – Resultados individuais do ensaio de esclerómetro .....	79
Quadro A.4 – Resultados individuais do ensaio dos tubos de Karsten dos betões A e B .....	81

Quadro A.5 – Resultados individuais do ensaio dos tubos de Karsten dos betões C e P .....	81
Quadro A.6 – Resultados individuais dos ensaios de capilaridade do betão A.....	82
Quadro A.7 – Resultados individuais dos ensaios de capilaridade do betão B .....	82
Quadro A.8 – Resultados individuais dos ensaios de capilaridade do betão C .....	83
Quadro A.9 – Resultados individuais dos ensaios de capilaridade do betão P.....	83
Quadro A.10 – Resultados individuais dos ensaios de secagem do betão A.....	84
Quadro A.11 – Resultados individuais dos ensaios de secagem do betão B.....	85
Quadro A.12 – Resultados individuais dos ensaios de secagem do betão C.....	86
Quadro A.13 – Resultados individuais dos ensaios de secagem do betão P .....	87
Quadro A.14 – Resultados individuais dos ensaios de compressão diametral .....	88
Quadro A.15 – Resultados individuais dos ensaios de compressão uniaxial para os provetes de 8 e 6 cm.....	88



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

### **Siglas:**

ACI – American Concrete Institute

CEN – Comité européen de normalisation

CNR /ICR – Consiglio Nazionale delle Ricerche e Istituto Centrale per il Restauro

DEC – Departamento de Engenharia Civil

EN – European Norm

ESLAM – Estruturas Laminadas de Engenharia, S.A.

FCT-UNL – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

IAEA – International Atomic Energy Agency

IPQ – Instituto Português da Qualidade

MIEC – Mestrado Integrado em Engenharia Civil

NP – Norma portuguesa

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

PCA – Portland Cement Association

RILEM – Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux

### **Betões utilizados:**

A – Traço 1:3:1 [cimento:terra:brita] e relação A/C de 0,6

B – Traço 1:3:2 [cimento:terra:brita] e relação A/C de 0,6

C – Traço 1:6:4 [cimento:terra:brita] e relação A/C de 0,75

P – Traço 1:2:2 [cimento:areia:brita] e relação A/C de 0,75

### **Ensaaios e parâmetros:**

CC – Coeficiente de absorção de água por capilaridade

CAA60 – Coeficiente de absorção de água aos 60 minutos

D.P. – Desvio-padrão

DS – Dureza superficial

$E_d$  – Módulo de elasticidade dinâmico

$f_c$  – Resistência à compressão uniaxial

$f_{ct}$  – Resistência à tracção por compressão

IS – Índice de secagem

$M_{ap}$  – Massa volúmica aparente

TS – Taxa de secagem

VA – Valor assintótico

$\lambda$  – Condutibilidade térmica



# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

A utilidade de juntar pedra, areia e um ligante para produzir betão já é conhecido desde a Idade da Pedra (Lea, 2004). Desde então foi aperfeiçoada por diversas civilizações, até que chegou aos nossos dias como sendo o material de construção artificial mais utilizado na construção civil no Ocidente.

A sua composição produzida através de cais ou cimentos (ligantes), agregado fino e grosso, água e por vezes com adjuvantes e adições, cria uma reacção química entre a água e o ligante que o faz endurecer, adquirindo excelentes propriedades para alguns tipos de construção. As razões principais que levaram à utilização massiva deste material prendem-se com a possibilidade de obter variadas formas, ter um reduzido tempo de cura, elevada resistência à compressão, para além de poder ser usado em situações adversas e em muitos tipos de locais (Lea, 2004; Duggal, 2008).

A terra está presente na arquitectura desde as primeiras construções feitas pelo Homem e existe em quase todas as zonas de clima quente e temperado, com uma incidência menor em regiões frias (Viñuales, 2008).

Existem interesses convergentes para uma arquitectura sustentável e a herança deixada pela construção em terra está em franca expansão. Esforços de conservação apontam não só para a protecção do edificado em terra mas para preservar a viabilidade de projectar e construir em terra. A ausência de normas para a construção em terra, em vários países, leva à sua proibição, e a falta de investigação e desenvolvimento por parte das universidades e indústrias da construção, opõem-se assim à normalização e melhorias dos materiais e da própria construção em terra.

Actualmente quase 50% da população mundial vive em habitações com terra como a sua base construtiva (Avrami, et al., 2008). Este tipo de construção existe em muitos países do mundo, particularmente em África, Ásia e na América do Sul, no entanto, também pode ser encontrada nos Estados Unidos da América, Austrália e em muitos países da Europa. Refira-se que estes países desenvolvidos têm dado uma maior importância à sustentabilidade da construção, onde a terra tem um papel essencial (Pacheco-Torgal & Jalabi, 2011).

Perante o facto de países em desenvolvimento e desenvolvidos estarem envolvidos na dinamização e melhoramento duma construção sustentável com a terra como material de eleição, faz com que este tema ganhe uma grande importância e cada vez maior relevância no panorama nacional e internacional, aumentando assim mais o seu contributo para um futuro mais ecológico da construção.

A presente dissertação é realizada no âmbito de um projecto do Quadro de Referência Estratégica Nacional (QREN), denominado de PT QREN/21586/2011 – Parede eco-estrutural, desenvolvido em conjunto com a empresa ESLAM - Estruturas Laminadas de Engenharia, S.A. e a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL).

O projecto, onde se insere esta dissertação, prevê o desenvolvimento de painéis modulares pré-fabricados com a finalidade de serem aplicados em edifícios de pequeno porte em países com grandes necessidades habitacionais, com vista a um desenvolvimento sustentável do edificado. Para isso prevê-se o uso de terra da zona onde será implantado o edifício para a construção de diversos elementos das habitações, nomeadamente revestimentos das paredes, uma parede complementar em alvenaria de blocos de terra e, eventualmente, como constituinte principal dos próprios painéis pré-fabricados (Faria, et al., 2013). Relativamente à produção dos painéis existe a hipótese de ser um betão correntemente utilizado pela ESLAM ou, em alternativa, um betão em que parte do agregado seja substituído por terra. Para avaliar esta possibilidade foram elaborados na ESLAM e ensaiados na FCT-UNL provetes de diversos betões. Os betões com terra ensaiados variavam na quantidade de terra presente na sua mistura, variando o traço ponderal de ligante, terra e brita. Para além dos provetes de betão com terra foi também ensaiado um outro de betão com agregado corrente, que serviu como referência aos restantes neste trabalho de investigação.

Este projecto envolveu dois temas de dissertação, cuja parte experimental foi desenvolvida em paralelo. Para além do presente, que trata a caracterização de betão com terra através de provetes cilíndricos, esteve também envolvida a colega Cátia Abreu, do Mestrado Integrado em Engenharia Civil (MIEC), que desenvolveu o mesmo tema, mas relativo a provetes laminares (Abreu, 2013).

### **1.2. Objectivos e metodologia**

Esta dissertação tem como objectivo aferir qual a influência da substituição do agregado fino de um betão corrente, por terra. Essa aferição é realizada através da caracterização de betões com diferentes proporções de ligante:terra:agregado corrente, utilizando provetes cilíndricos e comparando com um betão corrente (betão de referência). A caracterização envolveu aspectos mecânicos e físicos. Eventuais reduções em agregado fino têm como finalidade a utilização de material autóctone (terra) da zona onde será usado, assim como a redução do custo de produção e da pegada ecológica criada pela exploração dos constituintes do betão.

Toda a campanha experimental foi planeada e estruturada pela orientadora da presente dissertação, Professora Paulina Rodrigues, inserida num projecto do Quadro de Referência Estratégica Nacional (QREN) denominado de Parede Ecoestrutural, realizado em promoção conjunta entre a empresa Estruturas Laminares de Engenharia, S.A. (ESLAM) e a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL). Esta campanha foi sempre auxiliada pelo Engenheiro Vítor Silva, bolseiro da FCT-UNL, e pela colega Cátia Abreu do mestrado integrado em Engenharia Civil (MIEC), que realizou o mesmo tipo de campanha experimental no âmbito da sua dissertação que visa o estudo do betão com terra através de provetes laminares.

A campanha experimental pode ser dividida em duas fases distintas, sendo a primeira relativa aos ensaios não-destrutivos e a segunda aos destrutivos (mecânicos).

Na 1ª fase foram realizados os seguintes ensaios:

- **Ensaaios Físicos:**

- Ensaio de Ultra-sons;
- Ensaio de Condutibilidade Térmica;
- Ensaio de Esclerómetro;
- Ensaio de Absorção de Água sob baixa Pressão através de Tubos de Karsten;
- Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade;
- Ensaio de Secagem.

Na 2ª Fase foram realizados os seguintes ensaios:

- **Ensaaios Mecânicos**

- Ensaio de Resistência à Compressão Diametral;
- Ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial.

### 1.3. Organização do texto

A presente dissertação está organizada em 5 capítulos, com este capítulo introdutório a ser o inicial.

No segundo capítulo é apresentado o actual estado do conhecimento relativo ao betão corrente e com terra e aos seus constituintes, sendo feito o enquadramento histórico, incluindo a normalização existente.

O terceiro capítulo é relativo à campanha experimental realizada, onde, no início, é feita a caracterização e apresentação dos provetes e, são descritos os ensaios realizados, para além dos materiais utilizados e procedimentos seguidos. São ainda apresentados os resultados obtidos em toda a campanha através da análise de quadros e figuras.

No quarto capítulo é feita a análise dos resultados obtidos, através da comparação entre ensaios realizados na presente dissertação com os da colega Cátia Abreu do MIEC (Abreu, 2013) e recorrendo à bibliografia existente, de modo a chegar a conclusões.

O quinto capítulo é referente às conclusões obtidas e proposta de desenvolvimentos futuros para o avanço e dinamização da utilização deste tipo de material.

Por fim, é apresentada a bibliografia utilizada para a realização da dissertação e anexos.



## **2. Estado do conhecimento**

### **2.1. A utilização do cimento e betão na construção**

#### **2.1.1. Cimento**

Os ligantes hidráulicos são constituídos por pós muito finos que, misturados com água, formam uma pasta cujo endurecimento é dado só pela reacção química entre o pó e a água (Coutinho, 1988). Os ligantes hidráulicos já são utilizados, crê-se, desde a descoberta do fogo (Paleolítico). A descoberta do fogo e a sua utilização sobre rochas calcárias ou margosas, fazia com que fosse obtido um pó que a água da chuva trataria de tornar mais resistente e duro. Daqui podia-se então usar este pó como ligante entre alvenarias, tanto de tijolo como de pedra. Deu-se então início à fabricação de novos ligantes, agora misturando outros materiais, tais como areia e fragmentos de tijolos, havendo determinados tipos que se revelavam ser mais resistentes à água. Durante o império romano houve um grande desenvolvimento nesta área, nomeadamente no fabrico de argamassas hidráulicas usando como base as pozolanas, tendo uma grande contribuição sido dada por Vitruvius (séc. I a.C.) e Plínio (séc. I d.C.).

Após a queda do império romano, não houve grandes seguidores das técnicas e conhecimentos que detinham sobre os ligantes hidráulicos, perdendo-se boa parte desta herança. Até ao século XVIII foi reduzida a evolução nesta área, até que Louis Vicat a revolucionou por completo, ao ser responsável pela descoberta do cimento artificial (Coutinho, 1988). Na mesma altura foram patenteadas novos ligantes hidráulicos, uma delas por Joseph Aspdin que descreveu o seu material como “Cimento Portland”, tendo sido usado este nome porque eram reconhecidas grandes qualidades da rocha de Portland, nomeadamente a sua qualidade e durabilidade. As características do cimento Portland têm vindo a ser desenvolvidas com o avanço da tecnologia, levando ao seu melhoramento, nomeadamente as suas características mecânicas e o seu processo de fabrico que muito tem evoluído nestes últimos anos (Lea, 2004).

#### **2.1.2. Betão**

A utilização do betão, como a mistura de pedras e areia com ligante, é quase tão antiga como a própria Humanidade, mesmo não havendo dela edificações que tenham chegado aos nossos dias (Margarido & Gonçalves, 2012). Tal facto deve-se, muito provavelmente, ao uso da argila como ligante, que devido à sua natureza não tem uma longevidade tão grande como a de outros materiais. A descoberta da construção mais antiga feita de betão encontra-se em Lepenski Vir, na actual Sérvia, e data de 5600 a.C.. O betão é, neste caso, usado como pavimento térreo de uma habitação, sendo o ligante usado a cal parda. A utilização deste tipo de material evoluiu bastante na era romana com a construção de obras públicas, tais como viadutos, aquedutos e estradas, assim como outras obras de grande importância, sendo elas cais, basílicas e termas. O betão usado nesta altura era constituído por

mistura de pedras e areia com cal, sendo em alguns casos de natureza pozolânica, que dava a essas construções uma boa resistência à água (Margarido & Gonçalves, 2012).

Durante a Idade Média continuou-se a utilizar o betão, mas agora numa escala muito menor, o que levou a que o conhecimento do material e das técnicas de construção usadas pelos romanos, tornasse a sua construção bastante inferior em termos de qualidade. Até ao século XIX, houve pouca evolução nos processos de construção, sendo praticamente usado em fundações e no interior de paredes de alvenaria (Ferreira, 1989). Com a revolução industrial surge a descoberta do cimento Portland em 1895, que muito contribuiu para a massificação do uso do betão, tornando-o no material de construção mais versátil. Contudo, a verdadeira revolução só aconteceu com a introdução do betão armado. As primeiras construções, neste material, datam do início do século XIX e são limitadas à execução de coberturas e pavimentos, tratando-se de estruturas mistas, tendo este processo sido patenteado por William Fairbairn, em Inglaterra, no ano de 1844. Na mesma altura, destacava-se também François Coignet que regista as suas primeiras patentes em França, sendo uma delas, “Béton Economique et Emploi du Béton” em 1855 (Ferreira, 1989). Todo este novo conhecimento do material e da sua cada vez maior utilização prática, muito devida às suas características físicas, mecânicas e à sua versatilidade, fez com que se tornasse um material de eleição na construção na segunda metade do século XX, usado nas mais variadas obras por todo o mundo.

### **2.2. A utilização da terra na construção**

A construção em terra é conhecida desde há milhares de anos, tendo sido descobertas construções em adobe no período de 8000 a 6000 a.C. no Turquestão, assim como construções em taipa, na Mesopotâmia entre 5000 e 4000 a.C. A terra era usada como material de construção tanto para habitações e muralhas, assim como para edifícios religiosos e palácios. A China foi um importante impulsionador no uso da taipa, sendo o maior exemplo desse facto, a grande muralha da China, que foi inicialmente construída nesse material e, só mais tarde viria a ser revestida, e em alguns troços reconstruída, com pedra e tijolo, dando-lhe o aspecto que hoje conhecemos (Minke, 2006).

Crê-se que o uso de taipa na zona do mediterrâneo tenha começado com os Fenícios no norte de África (Houben & Guillaud, 1994), fixando-se depois no sul de Espanha por volta de 800 a.C. (Chazelles, 1993). Os romanos não foram grandes utilizadores deste material nas suas obras, usando mais o betão de base pozolânica, havendo apenas registos do uso de taipa no sul de França, em cidades como Lyon e Marselha (Houben & Guillaud, 1994). Foi no norte da Europa, mais concretamente na Alemanha em 6000 a.C., que mais cedo se começou a usar a taipa, sendo então usada para enchimento das paredes das casas com estrutura em madeira (Minke, 2006).

Sabe-se que houve um grande aumento na utilização da terra, mais especificamente da taipa, durante a expansão muçulmana, nomeadamente na Pérsia e na península Arábica, assim como em todo o norte de África e na Ibéria durante o século IX a.C. (Azuar Ruiz, 1995), sendo grande parte desse



aumento devido a fortificações (castelos, fortes e muralhas), em Alcazar na cidade de Granada e o Castelo de Atalaia em Vilhena (Graciani Garcia & Tabales Rodriguez, 2003).

Na Idade Média, os líderes cristãos continuaram a usar a taipa como material de construção em todo o tipo de estruturas, tanto de cariz militar como civil, apesar de, em alguns casos, ter havido reforço em alvenaria de pedra dessas mesmas estruturas (Jaquin, et al., 2007a).

Durante o século XVIII, na Europa, houve um aumento significativo da construção em terra por ter um custo baixo e relativa facilidade construtiva, além de contrariar o elevado consumo de madeira, material de construção que nessa altura predominava. É de referir que na Alemanha, durante este período, assistiu-se a uma grande difusão desta solução construtiva, relacionada maioritariamente com a sua maior resistência ao fogo quando comparado com as construções tradicionais em madeira (Minke, 2006).

O século XX foi um período propício à construção em terra, principalmente após as duas grandes guerras, que levou a que as pessoas usassem um material barato para construir rapidamente as suas casas e outras instalações necessárias à população (Easton, 2007; Swenarton, 2003; Keable, et al., 2005). Foi no Reino Unido e Alemanha que mais expressão teve este tipo de solução, chegando também aos Estados Unidos, em que o programa “New Deal” deu início à construção de muitas habitações após a crise financeira dos anos 30 (Tibbets, 1989; Easton, 1996). Desde os anos do pós-guerra até à década de 70, a construção em terra caiu em desuso, até que começou a ser novamente estudada por vários grupos em todo o mundo, nomeadamente académicos e construtores, tendo como objectivo a sua maior utilização como material de construção sustentável (Jaquin, 2008; Minke, 2006).

Nos últimos anos tem-se vindo a adoptar mais a construção em terra devido maioritariamente à sua sustentabilidade que, com o aumento da população a nível mundial, nos começa a fazer pensar em soluções adequadas para fazer face a este aumento. Para isso temos que investir em soluções amigas do ambiente e que, ao mesmo tempo, cumpram as exigências tanto de resistência como de conforto, tudo isto com custos comportáveis.

Existem diversas técnicas construtivas em terra, da qual a maior parte já é usada há milhares de anos e que consiste na mistura de terra com água, tendo a terra que ter alguma percentagem de argila e pode ter, ou não, na sua constituição cascalho, areia e silte e mesmo fibras, das quais se destaca a palha. As técnicas construtivas dividem-se em três grupos sendo eles: (Houben & Guillaud, 1989)

- Monolítica (in situ);
- Alvenaria portante;
- Por enchimento.

Entende-se por técnica construtiva monolítica quando se compreende a elevação “in-situ”, não havendo separação entre o material e a técnica construtiva.

Relativamente à técnica de alvenaria, mais especificamente alvenaria portante compreende a manufacturação prévia de unidades em terra, sendo utilizadas na construção após a sua secagem.

Através destas unidades podem ser levantadas paredes em diversos aparelhos, arcos, cúpulas ou abóbadas.

A técnica de enchimento considera a utilização da terra como elemento secundário, seja no enchimento ou revestimento de outras estruturas. São normalmente utilizadas estruturas em madeira ou em materiais de origem vegetal, nomeadamente canas ou bambu.

No Quadro 2.2 são apresentados e descritas as principais técnicas construtivas em terra segundo Houben & Guillaud (1989).

Quadro 2.1 – Descrição das principais soluções construtivas em terra  
(Adaptado de (Houben & Guillaud, 1989))

<b>Monolítica</b>	<b>Descrição</b>
Terra prensada: taipa	Consiste em comprimir camadas de terra quase seca dentro de uma cofragem (taipal) geralmente feita em madeira.
Terra empilhada	Consiste em empilhar bolas de terra ou molhes de lama e palha à fiada, até formar parede. Pode ser aparada e regularizada à superfície.
Terra modelada	Consiste em moldar ou esculpir a terra à fiada no estado plástico para formar paredes. Normalmente associada a construções de planta circular e muitas vezes bem decoradas.
<b>Alvenaria</b>	<b>Descrição</b>
Blocos prensados	Consiste na compressão em moldes de terra seca com uma grande percentagem de partículas finas. Também conhecidos como BTC (Blocos terra comprimida).
Blocos cortados	Consiste na utilização de solos superficiais de características minerais com boa coesão. Devido à oxidação ao longo do tempo, atinge uma elevada dureza, sendo às vezes confundido com construção em pedra.
Adobe manual	Técnica muito antiga que consiste em moldar ou esculpir a terra em estado plástico só com as mãos que, depois de seca, se usa na elevação de paredes.
Adobe moldado	A sua manufactura consiste no enchimento com terra no estado plástico em moldes sendo ligeiramente pressionados com as mãos para serem depois retirados os moldes para secar ao sol.
<b>Enchimento</b>	<b>Descrição</b>
Terra palha	Processo que usa a terra sob a forma de barbotina de terra argilosa misturada com palha ou outro cereal. Usada em pavimentos, paredes ou isolamento. Técnica utilizada particularmente em França e Alemanha.

### 2.3. Utilização de solo-cimento e betão com terra

A construção em terra tem vantagens e desvantagens, mas devido às suas características não serem por vezes suficientes, leva a que seja utilizada conjuntamente com outros materiais, nomeadamente cimento e cal que fazem com que sejam melhoradas as características mecânicas da terra (Neves, 2005).

O uso de solo-cimento tem como finalidade a melhoria das características mecânicas do solo para obras de engenharia, de acordo com a definição do American Concrete Institute (ACI) 230.1R-90 que refere: “Material produzido através de combinação, compactação e cura de uma mistura de solo/agregado com cimento Portland, com possibilidade de incluir pozolanas e água para formar um material com maior resistência com propriedades específicas para obras de engenharia. As partículas de solo/agregado estão ligadas por pasta de cimento mas, ao contrário do betão, as partículas de agregado podem não estar completamente cobertas por pasta de cimento” (ACI, 1990).

A utilização de solo-cimento é maioritariamente feita em camadas de base e sub-base de pavimentos, tendo, neste caso, o objectivo de desempenho de funções como material estrutural, levando a que as suas características mecânicas ganhem maior relevância, nomeadamente a resistência à compressão (PCA, 1971; ACI, 1990). O solo-cimento é utilizado em camadas de base para prevenir a capilaridade de finos provenientes da camada de solo da sub-base do pavimento e de tráfego pesado. Para além disso, proporciona uma camada uniforme, uma boa fundação para o pavimento que não apresentará assentamentos mesmo quando sujeito a tráfego pesado (ACI, 1990).

Esta solução pode ser usada em pavimentos com várias finalidades, tais como:

- Parques de estacionamento;
- Portos de contentores;
- Armazéns e edifícios industriais;
- Terminais de comboios e autocarros;
- Fundações de edifícios.

A construção de pavimentos em solo-cimento trás várias vantagens comparando com as soluções tradicionais, nomeadamente ao nível de custo, por o material de construção (terra) se encontrar nas proximidades ou mesmo no local da obra, sendo que, quase todo o tipo de solo é adequado. Para além da redução do custo de transporte, é necessária uma menor quantidade de cimento a misturar com o solo mais grosseiro relativamente aos solos argilosos e siltosos. Tem ainda como vantagem a rápida construção, pois qualquer que seja o solo usado é misturado e compactado “in-situ”, ganhando presa rapidamente, assim como grande parte da sua resistência mecânica. Devido à maior rigidez do solo-cimento, quando é utilizado num pavimento, a espessura total das camadas será menor do que nos

pavimentos normalmente utilizados, devido à distribuição de cargas ser feita numa área maior (PCA, 2005). Apesar de não ser a sua utilização mais tradicional, o solo-cimento também pode ser encontrado em construção de edifícios em diferentes regiões do globo, tanto no norte de África e Índia, assim como na Austrália e Nova Zelândia (Morton, 2008). É normalmente utilizado em blocos de terra comprimida (BTC), mas também existem casos de utilização em taipa. O principal objectivo do solo-cimento prende-se com a estabilização da terra, fazendo com que aumente a sua resistência à compressão, haja melhor coesão e maior resistência à água, devido à menor porosidade do cimento face à terra. Para além disso, o aumento da resistência térmica e acústica tem bastante relevância na construção, visto reduzir os consumos energéticos para manter o conforto dentro da habitação e proporcionar maior conforto aos seus utilizadores. Esta solução proporciona uma construção sustentável e com baixo impacto sobre o ambiente, devido à abundância de terra para além do seu baixo custo de exploração e construção (Morton, 2008; Walker, 1995; Reddy & Kumar, 2009; Morel, et al., 2000)

É importante também referir que o solo-cimento tem vindo a ser mais utilizado em construção de pequeno-porte por ser de fácil execução e por não necessitar de mão-de-obra qualificada e, com a introdução da prensa “Cinva Ram” em 1952 na Colômbia (Figura 2.1), passou a ser possível a produção de blocos de terra comprimida em maior quantidade e rapidez, melhorando também as suas características (Reddy & Gupta, 2004). Com a maior procura e produção de BTC existe um maior interesse em desenvolver este material, havendo uma evolução natural na sua forma e comportamento, que passou do tradicional bloco maciço paralelepípedo a perfurado, alveolar e de encaixe. Este último permite passagem de tubagem pelo seu interior, tornando a construção mais rápida, assim como o contraventamento da própria estrutura. Começando a haver uma maior aceitação por parte da população/sociedade, existe maior probabilidade de vir a existir maior controlo de qualidade na sua produção, assim como normas e especificações para este tipo de material, como acontece com o cimento e a alvenaria de tijolo.



Figura 2.1 – Prensa “Cinva-Ram” (Reddy & Gupta, 2004)

Com o grande aumento da população em África tem havido necessidade de construir residências e infra-estruturas para os seus habitantes, mas tratando-se de um continente em vias de desenvolvimento

e, com o custo dos materiais de construção a aumentar, a construção tem que ser de baixo custo e sustentável e, que ao mesmo tempo, tenha uma vida útil longa. Para isso foi escolhido material local para o fabrico do betão, com a particularidade de ter havido apenas a substituição parcial, ou total, do agregado fino tradicional, a areia, por laterite (Lasis & Osunade, 1990). A laterite é um tipo de solo muito alterado com grande concentração de hidróxidos de alumínio e ferro, que se encontra em regiões de clima quente e húmido. Este processo de alteração do solo é designado por laterização e caracteriza-se pela ocorrência de lixiviação que ocorre pelo excesso de chuvas ou irrigação, podendo vir a formar uma crosta constituída por nutrientes do solo, como ferro e alumínio, impedindo assim a penetração de água até níveis de profundidade superiores à camada de laterite formada. (Wikipedia, 2013). Este agregado é escolhido por ser abundante e fácil de obter, para além do seu baixo custo. Tem sido utilizado como um dos principais materiais de construção na Nigéria e em outros países em vias de desenvolvimento por todo o mundo. Esta solução tem vindo a ser implementada apenas em habitação de baixo custo para edifícios de pequeno porte, assim como infra-estruturas rurais, devido à ausência de conhecimento relativo ao seu comportamento mecânico, nomeadamente o seu comportamento na fase plástica. Perante esta situação, são excluídos os edifícios de médio e grande porte, que devido à ausência de normalização sobre o seu comportamento não conseguem ser dimensionados quando aplicado no betão com solo laterítico. (Ata & Adesanya, 2007). A utilização de solo laterítico no betão é, em grande parte, na construção de blocos de laterite comprimida (BLC) usando como estabilizador o cimento Portland (Ata & Adesanya, 2007).

Para o desenvolvimento da presente dissertação, foi também estudado o tema de betão com terra através de provetes laminares pela colega de mestrado, Cátia Abreu (Abreu, 2013), com vista à sua aplicação em construção modular prefabricada (Faria, et al., 2013).

## **2.4. Avaliação das características dos materiais através do ensaio de provetes**

Para esta dissertação é fundamental haver um estudo das acções mecânicas, assim como da durabilidade, de modo a avaliar as características e comportamento dos materiais, neste caso dos betões. Com esse objectivo foram aplicados métodos destrutivos, como os ensaios de compressão diametral e uniaxial, e métodos não-destrutivos, como o ensaio de ultra-sons, de condutibilidade térmica e por esclerómetro.

Para além dos ensaios anteriormente mencionados, de referir também os de capilaridade e secagem, visto que a água é um dos factores mais importantes a ter em conta na definição de soluções e técnicas construtivas a utilizar, assim como o seu modo de aplicação e a sua influência na durabilidade da obra.

### 2.4.1. Condutibilidade Térmica

A importância do comportamento térmico de um material a ser usado na construção de edifícios de qualquer categoria, sejam eles comerciais, industriais ou residenciais, tem cada vez mais relevância na indústria da construção. Há que ter em conta não só por razões de conforto ou económicas, mas também ambientais e de sustentabilidade. Cada vez mais é necessário otimizar as soluções ao dispor com vista a ter menores consumos energéticos, como forma de contrariar a tendência do aumento do consumo de energia no planeta para além da maior escassez de recursos provenientes de fontes não renováveis. Para isso são usados cada vez mais os isolantes térmicos que diminuem a energia transmitida entre o interior e exterior do edifício. Esse parâmetro está presente nos isolantes térmicos através duma propriedade denominada por condutibilidade térmica,  $\lambda$  [W/(m°C)]. Com esta característica do material podemos diminuir a espessura a utilizar, apresentando uma condutibilidade térmica baixa para assim cumprir os objectivos da solução escolhida.

### 2.4.2. Ultra-sons

O desenvolvimento de um aparelho que permitisse medir a propagação de ondas geradas por meios mecânicos surgiu quase simultaneamente em Inglaterra e Canadá. (Whitehurst, 1966). Este desenvolvimento foi resultado de trabalhos anteriores levados a cabo pelo Corpo de Engenharia do Exército dos E.U.A. na medição da velocidade de propagação das ondas através do betão (Long, et al., 1945). Na década de 1940, um grupo de engenheiros que fazia parte da Comissão de Energia Hidro-eléctrica de Ontário, no Canadá, começou a trabalhar num aparelho que permitia determinar a profundidade de fendas numa barragem. O aparelho que foi desenvolvido chamava-se “Soniscope” e consistia num transdutor que emitia ondas com frequências de 20 kHz conseguindo atingir até 15m de espessura de betão, com erro de leitura de apenas 3%. O “Soniscope” foi projectado com o objectivo de detectar fendas internas e conhecer a profundidade das fendas do betão, assim como determinar o seu módulo de elasticidade dinâmico (Leslie & Cheeseman, 1949). O princípio do ensaio de ultra-sons baseia-se na teoria da propagação de ondas, existindo três tipos fundamentais de ondas criadas quando o meio sólido é perturbado por acções vibratórias, designadas por ondas de compressão, transversais e de superfície. A velocidade das ondas depende das características do meio onde se propaga, variando com a massa volúmica do material. Assim, conhecendo-se a densidade e a velocidade da propagação da onda, consegue-se estimar as características do material. Os aparelhos de ultra-sons medem a velocidade das ondas de compressão, que são as mais rápidas das três anteriormente mencionadas. (Naik & Malhotra, 1991)

Este ensaio tem como objectivo a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico a partir das velocidades calculadas através dos tempos dados pelo aparelho de ultra-sons. Existem ainda outras aplicações, obtidas a partir de informação deste método, tais como (IAEA, 2002):

- Determinação da uniformidade do betão numa peça ou entre peças;
- Medição da deterioração das propriedades do betão ao longo do tempo;
- Indicação da qualidade do betão.

Para se obter a velocidade de propagação dos ultra-sons existem três modos: directo, indirecto ou semi-directo. Os modos de obtenção da velocidade variam conforme a posição relativa dos transdutores colocados sobre o betão.

- ***Método directo***

No método directo, os transdutores são colocados frente-a-frente em faces opostas do provete (ver Figura 2.2). Este método é o mais eficaz, pois a energia emitida e recebida é máxima. É normalmente utilizado para avaliar características de resistência mecânica e homogeneidade, assim como detecção de descontinuidades e obtenção do módulo de elasticidade dinâmico.

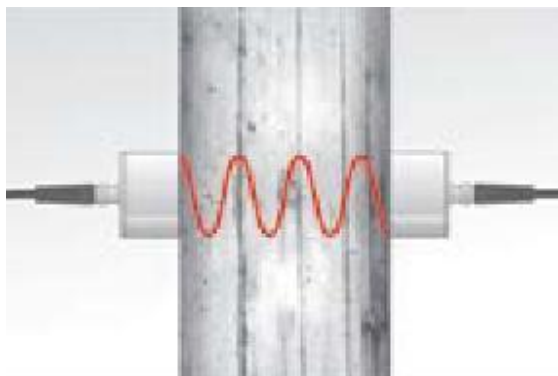


Figura 2.2 – Método directo de propagação de ultra-sons  
(PROCEQ, 2007)

- ***Método Indirecto***

No método indirecto, os transdutores são colocados na mesma face (Figura 2.3). Por este método os resultados são menos fiáveis devido à intensidade do sinal ser menor em relação ao método directo. Utiliza-se este método apenas quando só temos acesso a uma das faces do provete, como é o caso de lajes, pavimentos de betão ou barragens.

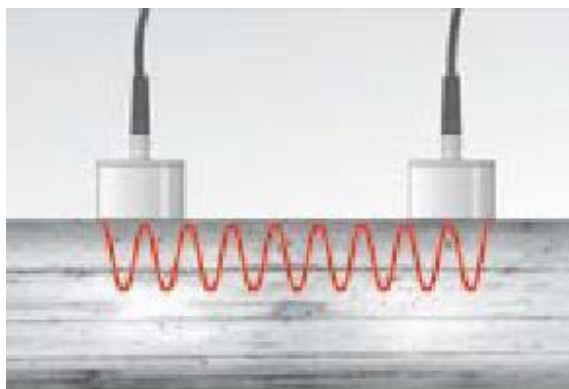


Figura 2.3 – Método indirecto de propagação de ultra-sons  
(PROCEQ, 2007)

De referir que, quando os transdutores são colocados próximo um do outro, o impulso começa a propagar-se por camadas mais profundas do betão. Este facto tem particular relevância no caso das características entre a superfície e as camadas mais profundas do betão serem diferentes, podendo os valores obtidos não serem representativos do material em análise. No entanto, este inconveniente pode ser útil na detecção e estimativa da espessura de uma camada de betão de diferente qualidade. Um betão de características diferentes pode dever-se a erros construtivos ou reacções que ocorreram posteriormente (Crawford, 1997).

- ***Método semi-directo***

Para o método semi-directo, os transdutores estão colocados em faces opostas, estando posicionados obliquamente entre si, ou seja, não existe um eixo comum normal à face dos transdutores, à semelhança do que acontece no método directo, ou em faces adjacentes, como ilustra a Figura 2.4.

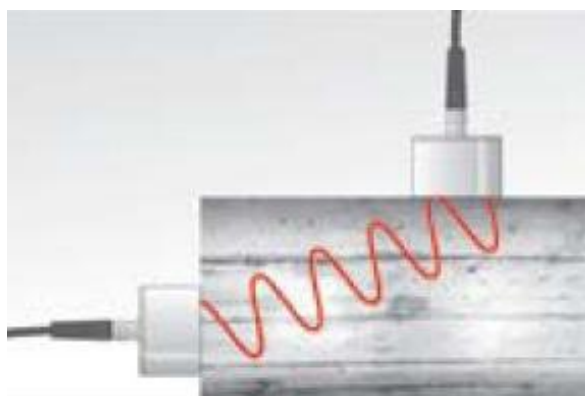


Figura 2.4 – Método semi-directo de propagação de ultra-sons  
(PROCEQ, 2007)

Este método é útil quando se pretende evitar regiões de armadura, nomeadamente em cantos de pilares e vigas, sendo que a informação fornecida é igual à do método directo. No entanto, deve haver



especial cuidado para não afastar demasiado os transdutores para evitar que haja diminuição do impulso, ao ponto de não ser recebido.

Existem factores que importa mencionar devido ao condicionamento que exercem nas medições da velocidade de impulso, sendo eles:

- ***Tipo e dimensão do agregado***

É apontado por investigadores que as características do agregado influenciam a relação entre a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas e a resistência à compressão do material, tendo sido estudado por Hamassaki (1986) essa mesma relação, concluindo que, para betões com a resistência à compressão semelhante, o valor das velocidades obtidas era diferente devido ao agregado utilizado na mistura (Hamassaki, 1986).

- ***Teor de humidade***

O teor de humidade tem efeitos sobre a velocidade de impulso, sendo um físico e o outro químico. Estes efeitos são importantes, na medida em que irão estabelecer correlações com a resistência do próprio betão. Comparando um provete normalizado de betão com um elemento estrutural do mesmo betão pode haver uma diferença significativa entre eles, podendo uma parte desta diferença ser devida ao efeito que as diferentes condições de cura na hidratação do cimento e a outra parte ser devido à presença de água nos vazios (IAEA, 2002).

- ***Temperatura do betão***

Para temperaturas do betão entre 10 e 30°C não existe influência significativa sobre os valores de velocidade de impulso, assim como na resistência e propriedades elásticas do material. Fora deste intervalo de temperaturas é necessário fazer correcções à velocidade de impulso conforme indicado no Quadro 2.2 (IAEA, 2002).

Quadro 2.2 – Efeito da temperatura na transmissão do impulso (IAEA, 2002)

Correlação para a velocidade medida		
Temperatura [°C]	Betão seco ao ar [%]	Betão saturado de água [%]
60	+5	+4
40	+2	+1,7
20	0	0
0	-0,5	-1
-4	-1,5	-7,5

- **Comprimento do percurso**

Este parâmetro deve ser cumprido para que o impulso ultra-sónico não seja influenciado pela heterogeneidade do betão, de modo a que as leituras sejam referentes apenas ao cimento e agregado. Para isso, é recomendado que o percurso mínimo seja de 100 mm para o betão onde a dimensão máxima do agregado seja de 20 mm ou menor e de 150 mm para um betão em que os agregados tenham a dimensão máxima entre 20 e 40 mm. O comprimento do percurso é medido com auxílio de régua e se necessário calculado a distância entre pontos, no caso de não se conseguir medir directamente no provete.

- **Dimensões e formato do provete**

As dimensões dos provetes são independentes da velocidade de impulsos de vibração, excepção feita se a aresta mínima for menor que um determinado valor. Com o valor da aresta abaixo desse valor mínimo existe o risco da velocidade de impulso ser significativamente reduzida. O impacto desta redução depende, em grande parte, da razão entre o comprimento de onda do impulso vibratório e a menor dimensão da aresta do provete. O Quadro 2.3 apresenta a relação entre a velocidade de impulso no betão, a frequência do transdutor e a dimensão lateral mínima admissível do provete (IAEA, 2002).

Quadro 2.3 – Efeito das dimensões do provete na transmissão do impulso (IAEA, 2002)

Frequência do transdutor [KHz]	Velocidade do impulso no betão [km/s]		
	Dimensão lateral mínima admissível do provete [mm]		
24	146	167	188
54	65	74	83
82	43	49	55
150	23	27	30

- **Efeito dos varões de aço**

Quando se mede a velocidade de impulso calculada através dos tempos dados pelo aparelho de ultra-sons em betão armado nas proximidades de varões de aço o valor é normalmente superior em comparação com um betão simples com a mesma composição. Esta diferença de valores é explicada pelo facto da velocidade de impulso no aço ser até duas vezes superior no betão, sendo que o valor da velocidade pode ainda variar consoante a proximidade dos varões de aço, assim como do seu diâmetro e superfície, da quantidade presente no provete e a sua orientação em relação ao percurso de propagação. Deve-se então evitar que as leituras sejam feitas com os varões a intersectar o percurso entre os transdutores.

- **Razão água/cimento**

O aumento da razão água/cimento faz com que a velocidade de impulso diminua, devido à diminuição das resistências à flexão e compressão e da densidade (Crawford, 1997).

### 2.4.3. Dureza Superficial

Em 1948, o engenheiro suíço Ernst Schmidt, desenvolveu um martelo para testar a dureza do betão, baseado no princípio do ressalto (Malhotra & Carino, 2004). Este princípio baseia-se no facto de que o ressalto duma massa elástica está dependente da dureza da superfície com o qual a massa colide. Este valor aumenta consoante a resistência do betão, o que permite estimar esta propriedade (IAEA, 2002).

O esclerómetro (Figura 2.5) permite avaliar “in-situ” a dureza superficial do betão “in-situ”, delinear zonas ou áreas que apresentem qualidade deficiente ou estruturas com betão deteriorado através do valor do índice esclerométrico. A norma ASTM C805 faz referência ao uso de carotes para calibração do esclerómetro, assim como o ensaio de provetes. É um instrumento de fácil utilização, que permite obter um vasto número de leituras num curto intervalo de tempo. No entanto, é necessária uma avaliação cuidada dos resultados, devendo-se para isso calibrar o aparelho consoante o material a ensaiar, de modo a obter resultados mais fiáveis (Crawford, 1997). Este ensaio não-destrutivo é dos mais utilizados “in-situ”, por ser de baixo custo e rápido conhecer a uniformidade e qualidade do betão, informação que pode ser bastante útil antes de se passar para os ensaios destrutivos. Apesar de ser um aparelho usado “in-situ”, pode também ser usado em laboratório, já que permite medições com variadas orientações, seja ela horizontal, vertical para cima ou para baixo ou em qualquer outro ângulo intermédio.



Figura 2.5 – Esclerómetro de Schmidt pendular e esclerómetro de Schmidt  
(PROCEQ, 2007)

Como o ensaio apenas mede a resistência superficial do betão, os valores não reflectem a condição do material em maior profundidade na secção a ser testada. Os resultados são assim afectados por

variados factores como a irregularidade da superfície, tipo de agregado, idade do betão, assim como a humidade e o tipo de cimento.

Com o valor dado pelo aparelho permite a medição da quantidade de energia recuperada pelo ressalto da massa do pêndulo do esclerómetro, dado pelo índice esclerométrico, através duma escala graduada acoplada ao aparelho.

São descritos a seguir, de uma forma breve, os factores que afectam o índice esclerométrico (Crawford, 1997).

- ***Irregularidades da superfície***

A superfície do provete não deve apresentar irregularidades, pois altera significativamente os resultados. Na presença de rugosidades na face a ensaiar, os valores obtidos podem ser menores do que o esperado, sendo para isso necessário rectificar a superfície a testar, com vista a obter-se resultados mais precisos.

- ***Tipo de Agregado***

O tipo de agregado presente na mistura do betão com a mesma resistência à compressão apresenta índices esclerométricos sensivelmente maiores para agregado de origem granítica relativamente aos de origem calcária. Quando são efectuados ensaios em zonas onde o agregado grosso se encontra junto à superfície e, visto o agregado ser mais rígido que o ligante, os resultados são significativamente elevados, devendo por isso ser ignorados no cálculo da média das leituras.

- ***Idade do betão***

O betão começa a ganhar resistência superficial muito depressa nos primeiros sete dias, a partir do qual continua a ganhar significativa resistência por hidratação do cimento apesar de, nesta altura, o seu ganho de resistência ser menor. Sabendo isso, deve-se ter especial cuidado ao testar betões com menos de três dias de cura ou com menos de 7 MPa de resistência, pois o betão não se encontra em condições para ser testado, dando valores do índice esclerométrico baixos, para além de deixar marcas visíveis na superfície onde foi ensaiado.

- ***Teor de humidade***

Este factor tem um efeito profundo no índice esclerométrico, tendo sido testados provetes em condições saturadas mas com a superfície seca, obtendo-se normalmente resultados mais baixos em comparação com provetes secos ao ar (Crawford, 1997).

- ***Tipo de cimento***

O tipo de cimento utilizado tem um efeito significativo no índice esclerométrico, tendo em conta que, para betões com agregado corrente, a resistência do cimento é um factor de grande importância na definição da resistência final do betão. Como exemplo um cimento tipo III pode apresentar maiores valores de dureza superficial para menores tempos de cura relativamente a um cimento tipo I (Crawford, 1997).

- ***Movimento da peça de betão durante o ensaio***

No caso de ensaiar elementos que não pertençam a uma estrutura fixa, como é o caso de pequenos provetes, estes devem ser rigidamente fixados. Qualquer movimento causado pelo impacto do esclerómetro irá resultar em diminuição do índice esclerométrico.

A correlação existente entre a resistência do betão e o índice esclerométrico não é muito precisa, havendo variações entre 15 e 30% num grande número de amostras. Para se reduzir estas variações há que ter em conta as variáveis descritas anteriormente, desenvolvendo uma relação apropriada para o esclerómetro, em detrimento das correlações fornecidas pelo fabricante do aparelho. Para isso é necessário a calibração do esclerómetro através do ensaio de dureza superficial de carotes devidamente fixadas numa prensa e posteriormente sujeitas ao ensaio de compressão axial (Crawford, 1997).

#### **2.4.4. Permeabilidade à água sob baixa pressão através da utilização de tubos de Karsten**

Este método de ensaio foi criado por um investigador alemão chamado Rudolph Karsten que o descreveu num livro de que foi autor e publicado em 1963. Na década de 1970 ficou praticamente como ensaio normalizado devido ao trabalho conjunto entre o International Council on Monuments and Sites (ICOMOS) e o Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux (RILEM) que resultou em conferências e publicações em revistas científicas em 1978.

O tubo de Karsten tem sido usado nas últimas décadas como um método versátil na medição da água absorvida em elementos de fachada porosos e na avaliação da eficiência de produtos repelentes de água. A utilização deste ensaio é bastante útil para avaliar a durabilidade do material em estudo. A maioria dos resultados publicados sobre os tubos de Karsten é usado como meio de comparação com o ensaio de absorção de água por capilaridade.

Trata-se de um método não-destrutivo de fácil utilização que pode ser usado “in-situ” ou em laboratório (Hendrickx, 2012).

Os tubos de Karsten são dispositivos graduados que têm entre 0 e 4 cm<sup>3</sup> com um fundo fechado na parte inferior em formato cilíndrico, e podem ser utilizados em superfícies horizontais e verticais como se pode ver na Figura 2.6 esq. e dir. respectivamente.

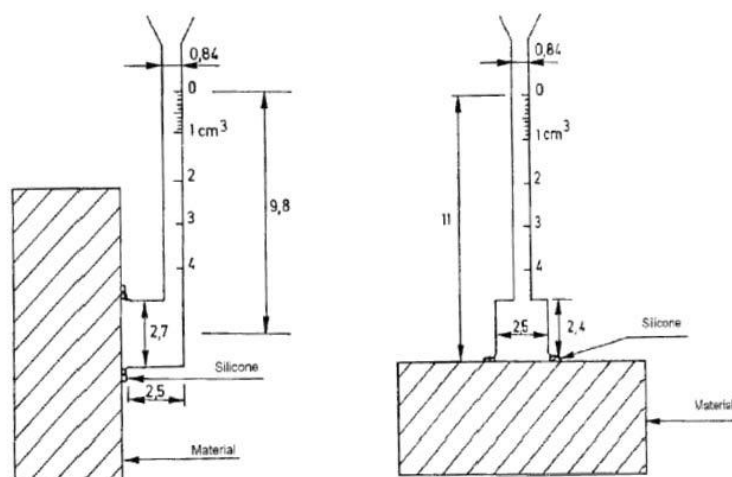


Figura 2.6 – Representação esquemática de tubo de Karsten para superfícies horizontais (esq.) e para superfícies verticais (dir.)  
(LNEC, 2002)

Este ensaio permite avaliar vários tipos de materiais, como argamassas, betões e alvenarias e, para isso, a aderência ao suporte é essencial. Em Portugal, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) sugere que se use silicone ou outro material apropriado que garanta assim a aderência e a impermeabilidade do tubo (LNEC, 2002).

#### 2.4.5. Absorção de água por capilaridade

Desde há muito tempo que existe a preocupação com a durabilidade do betão, assim como conhecer bem todas as características do material, com o objectivo de prevenir e evitar que as estruturas sofram degradação. Segundo Coutinho e Gonçalves (1994), a durabilidade traduz-se da seguinte forma: “A duração depende da intensidade dos factores de meteorização a que está sujeito e do grau de porosidade que o material possui, se se puser de lado a reactividade química com o meio, a qual pode também ser mais ou menos dominada através da porosidade, embora em pequeno grau, como é natural.” (Coutinho & Gonçalves, 1994)

A absorção de água por capilaridade é um dos principais mecanismos que a água tem para penetrar através do betão. Os fenómenos de absorção de água por capilaridade que são causados pela chuva de modo cíclico ou por ascensão capilar da água no solo, afectam a maior parte das estruturas em betão, tornando a água não só responsável pelo fenómeno de corrosão, para o caso do betão armado, mas também um veículo preferencial para agentes agressivos que estejam dissolvidos na água. O efeito da absorção de água por capilaridade é sugerido por Coutinho e Gonçalves (1994), como sendo a diferença de pressão gerada pela interface curva entre a fase líquida e a fase gasosa, ou seja entre o menisco capilar (esférico) e a parede do poro que é denominada de pressão capilar. Assim sendo, quanto mais fina for a rede porosa do betão, maior a facilidade que a água tem em penetrar, permitindo

atingir alturas superiores. Donde se pode concluir que a estrutura que constitui o betão ficará mais protegida, quanto menor for a absorção de água.

Existem diversos factores responsáveis pela variação da absorção de água, como é o caso da relação água-cimento (A/C), o teor de ligante, a idade e as condições de cura, a compactidade e trabalhabilidade do betão e ainda a absorção de água por parte dos agregados, tendo todos estes factores uma grande influência na resistência mecânica e durabilidade do betão.

No entanto existem produtos que podem reduzir substancialmente a absorção de água por capilaridade, designados por hidrófugos. Estes produtos actuam de duas maneiras: através da obturação dos poros por meio de partículas muito finas ou da criação de superfícies interiores que não são molhadas pela água. Em alternativa, podem ser usados os introdutores de ar que, ao reduzirem a relação A/C e a formação de um sistema de poros que não comunicam entre si, fazem com que a absorção capilar diminua (Coutinho & Gonçalves, 1994).

Os ensaios de absorção por capilaridade, embora sejam de relativa simplicidade, permitem conhecer algumas características do betão, nomeadamente o seu coeficiente de capilaridade e o valor assintótico, que serão muito relevantes no que se refere à sua durabilidade.

A obtenção da curva de absorção de água é o objectivo deste ensaio, de onde serão calculados o coeficiente de capilaridade e o valor assintótico, sendo que estes dois valores traduzirão a velocidade de absorção de água do betão assim como o valor máximo de água absorvida.

Para se definir o coeficiente de absorção de água por capilaridade é, de um modo geral necessário recorrer-se a ensaios em que se mede a velocidade de absorção de água pelo betão não saturado, normalmente imerso entre 2 e 5 mm de altura de água (Coutinho, J., 1998).

#### **2.4.6. Secagem**

Entende-se por secagem a extracção de um líquido, neste caso a água, de um qualquer material, por forma a se obter um material seco, através da transformação da água contida no material em vapor de água, seguida da evaporação do vapor de água para o ambiente (Krischer & Kroll, 1963).

A secagem dos materiais porosos com comportamento higroscópico, que são os mais correntemente utilizados na construção civil, ocorre em secagem natural, até se atingir um teor de humidade de equilíbrio, sendo função da humidade relativa do meio em que decorre a secagem. A partir desta fase, para se baixar o teor de humidade, a secagem do material tem que ser forçada, auxiliada por meios mecânicos, como seja estufa, centrifugação e vácuo, entre outros.

Quando um material de construção saturado é colocado num meio em que a temperatura e humidade são constantes, distinguem-se três fases distintas do processo de secagem (Krischer & Kroll, 1963)

A primeira fase é onde o fluxo de secagem é constante, havendo o transporte de água líquida, contida no corpo saturado, que é feito do interior para a superfície do material, através de forças capilares. A quantidade de água transportada para a superfície do corpo é maior que a quantidade de

água em forma de vapor que o material liberta por evaporação. De referir, que a quantidade de água evaporada nesta fase é aproximadamente constante.

O início da segunda fase de secagem começa a partir do instante em que a quantidade de água transportada para a superfície do corpo é menor que a quantidade de água na forma de vapor que o material liberta por evaporação. No decorrer desta fase o transporte de água líquida do interior para a superfície do material vai diminuindo progressivamente, mantendo, contudo, as condições de difusão entre a superfície do corpo e o meio envolvente.

Quando se atingir, em todo o material, o teor de humidade inferior ao teor de humidade crítico, ou seja, quando o material apresentar um comportamento higroscópico, dá-se então início à terceira fase do processo de secagem. Nesta fase, correspondente ao de equilíbrio higroscópico, o fluxo de secagem tende assintoticamente para zero.

O processo de secagem tem grande relevância nas características e comportamento do betão e do sistema construtivo no qual está inserido, do ponto de vista higrotérmico, e será condicionante, tanto em termos de durabilidade como para o seu desempenho durante a sua vida útil (Castro, 1998).

### **2.4.7 Resistência e ensaios mecânicos**

A resistência do betão é normalmente considerada como a sua propriedade mais importante, apesar de, em certos casos, existirem outras características, como a durabilidade e a impermeabilidade que são tão ou mais importantes que a resistência do material. Porém, na maior parte dos casos, a resistência costuma ser suficiente para se conhecer a qualidade do betão, visto estar directamente relacionada com as características da pasta de cimento.

A durabilidade e a resistência da pasta de cimento endurecida, parece não depender tanto da sua composição química, mas das ligações criadas na hidratação do cimento e no modo como esse volume é ocupado. É particularmente na presença de fissuras, descontinuidades e poros, que se consegue perceber a sua influência na resistência, sendo para isso importante o estudo dessas fracturas quando o betão está sob tensão. A porosidade da pasta de cimento é um parâmetro muito importante na qualidade do betão, porque a sua presença enfraquece a qualidade do próprio betão. Para além da porosidade da pasta de cimento há que ter também em consideração a porosidade do agregado, sendo ela responsável por microfissuras quando ligado ao cimento. Apesar de a porosidade ser um dos principais factores que influencia a resistência, é difícil quantificar e mesmo de calcular, sendo para isso necessário conhecer a relação água/cimento. De modo similar, a influência do agregado nas microfissuras do betão também se revela difícil de quantificar. Por estas razões, os factores com maior influência na resistência do betão são: relação água/cimento, grau de compactabilidade, idade e temperatura (Neville & Brooks, 2010).

Como as propriedades do betão variam com o tempo e com a humidade ambiente, os ensaios mecânicos têm que ser realizados sob condições conhecidas ou impostas. Para a determinação da resistência do betão são realizados ensaios mecânicos (destrutivos).



Existem várias razões para a realização de ensaios, mas os seus dois principais objectivos prendem-se com o controlo de qualidade e o cumprimento das respectivas normas.

Considerando estes dois objectivos, a escolha de ensaios de compressão, para controlo de qualidade, assenta em três suposições (Day, 2006):

- Todas ou a maioria das propriedades do betão estão ligadas à sua resistência à compressão;
- A resistência à compressão é a forma mais fácil, mais económica e mais precisa para ser sujeita a ensaios;
- O ensaio à compressão é a melhor forma para testar a qualidade do betão, dentro das opções disponíveis.

A resistência à compressão é determinada em provetes que são submetidos a uma carga axial num ensaio de curta duração, ou seja, submetido a uma velocidade de carregamento elevada. Os provetes geralmente utilizados para a determinação da resistência à compressão do betão têm forma cúbica ou prismática, podendo também ser de forma cilíndrica, com a relação de duas vezes a altura para o seu diâmetro, entre os que mais utilizados.

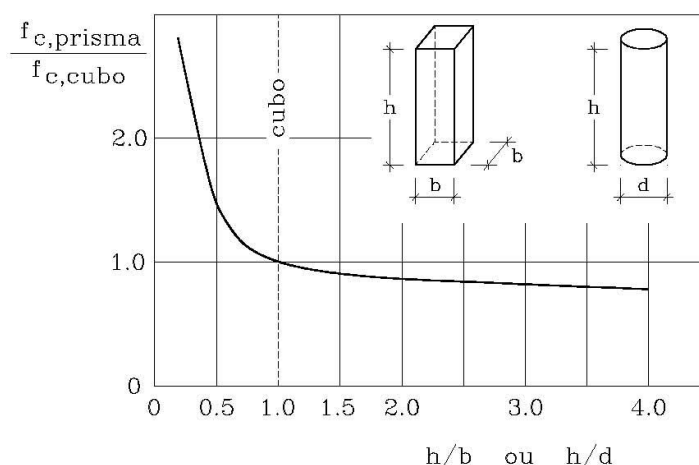


Figura 2.7 – Relação entre a resistência medida em provetes prismáticos e provetes cúbicos  
(Appleton & Costa, n.d)

Segundo a norma NP EN 206-1 (2007) estabelece que a resistência à compressão deve ser determinada em provetes cúbicos de 150 mm ou, em alternativa, em provetes cilíndricos de 150/300 mm, sendo caracterizada ao fim de 28 dias de idade do betão.



### 3. Campanha Experimental

A campanha experimental tem como objectivo avaliar o comportamento dos elementos de betão com terra, tendo para isso sido efectuados vários tipos de ensaios destrutivos e não-destrutivos. Toda a campanha experimental foi realizada nos laboratórios da Secção de Construção e Hidráulica e na Secção de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (DEC/FCT-UNL). Todos os procedimentos foram efectuados com base em normas actualmente em vigor, tendo em certos casos sido baseados em normas de materiais diferentes devido à ausência ou inadequação das mesmas para o betão com terra.

Os provetes cilíndricos de betão com terra foram fornecidos pela empresa ESLAM, tendo sido acondicionados na sala húmida do DEC sob condições controladas de temperatura de  $22\pm 3^{\circ}\text{C}$  e humidade de  $70\pm 5\%$  antes da realização dos ensaios.

#### 3.1. Betões e provetes

##### 3.1.1. Terra utilizada e composição dos betões

Para a produção dos provetes fornecidos foi utilizada terra duma obra situada na Foz do Arelho, concelho de Leiria, tendo em conta que a terra usada teria de ser proveniente de uma zona onde a construção com este material tivesse uma presença bastante forte. Além disso, existe também a caracterização dos provetes de terra serem comparados aos de betão padrão, de modo a reforçar uma metodologia de identificação e análise entre eles, criando assim um excelente método de comparação com um material de referência.

No Quadro 3.1. apresenta-se dados fornecidos pela ESLAM, referente às características dos provetes, nomeadamente os tipos de mistura, as suas quantidades e datas de produção, assim como a designação dada a cada mistura.

Quadro 3.1 – Designação, dimensão, quantidades dos provetes e data de produção  
(FCT-UNL & ESLAM, 2012)

Betão	Data de produção	Lajetas (50x30x5 [cm] e 40x40x8 [cm])	Cilindros ( $\Phi=15$ cm e h=30 cm)
A	21-11-2011	3 un.	3 un.
B	22-11-2011	3 un.	3 un.
C	23-11-2011	3 un.	3 un.
P	22-08-2012	3 un. com malha metálica interior	3 un.
	Não definida	2 un. (40x40x8 [cm])	

Dos provetes apresentados no Quadro 3.1., as misturas A, B e C são referentes ao betão com terra, sendo a mistura P referente ao betão padrão, constituído por agregado corrente (areia e brita), servindo como referência para os restantes provetes.

Para todos os provetes foi utilizado cimento CEM II B/L 32,5N, brita nº1 de origem calcária e terra da Foz do Arelho. No Quadro 3.2. é apresentada a constituição das misturas de betão.

Quadro 3.2 – Constituição dos betões  
(Faria, et al., 2013)

Betão	Cimento:Terra:Brita	Cimento:agregado	Brita:Terra	Relação A/C
A	1:3:1	1:4	1:3	0,6
B	1:3:2	1:5	1:1,5	0,6
C	1:6:4	1:10	1:1,5	0,75
P	1:2:2 [cim:areia:brita]	1:4 [cim:ag.(areia+brita)]	-	0,75

Analisando os valores dos traços do Quadro 3.2., verifica-se o traço maior de ligante para a mistura A, com o betão B a apresentar valor ligeiramente mais baixo e a mistura C com valor consideravelmente inferior ao das restantes, valores estes referentes ao traço cimento:terra:brita e ao cimento:agregado. Destaca-se também o traço igual entre o betão A e P relativamente ao cimento:agregado e a proporção mantida para as misturas B e C de agregado (brita:terra), sendo a proporção metade em comparação com A.

Como foi referido no Quadro 3.1, foram produzidas, para cada composição, três provetes cilíndricos com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura e três lajetas rectangulares com dimensões de 50x30x5 (cm), com todos eles a permanecer em cura durante um período mínimo de 10 meses nas condições de 70±5% de humidade relativa e 20±3°C de temperatura.

### 3.2. Ensaios realizados

Para a caracterização dos provetes cilíndricos de betão com terra, houve necessidade de se estudar o seu comportamento e características, tendo em vista a sua futura aplicação em elementos não-estruturais (paredes) em construção de pequeno porte em África. Para isso é necessário avaliar o seu comportamento mecânico e físico. De modo a estudar todos estes comportamentos, a campanha experimental traduz-se nos ensaios abaixo enunciados:

- Ensaio de ultra-sons;
- Ensaio de condutibilidade térmica;
- Ensaio de esclerómetro;
- Ensaio com tubos de Karsten;
- Ensaio de capilaridade e secagem;
- Ensaio de compressão diametral;
- Ensaio de compressão uniaxial.

### 3.2.1. Ensaio de ultra-sons

Este ensaio tem como objectivo a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ), tendo em conta as velocidades calculadas através dos tempos obtidos pelo aparelho de ultra-sons.

A metodologia para a medição de velocidades de impulsos provenientes de aparelhos de ultra-sons em estruturas de betão encontra-se na norma NP EN 12504-4 (2007) (IPQ, 2007), tendo sido a utilizada para a realização do ensaio. Dos vários métodos possíveis que a norma apresenta, apenas foi utilizado o método directo, que consiste na colocação dos transdutores em faces directamente opostas do provete. Trata-se do método mais eficaz, pois a energia emitida e recebida é máxima.

Os cilindros permaneceram na sala húmida desde a sua recepção, até à data de início do ensaio, dia em que foram mudados para a sala condicionada que apresentava as condições de humidade de  $65 \pm 5\%$  e temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . De referir que, nos dias seguintes ao transporte, se encontrava uma temperatura exterior elevada, não tendo sido sempre possível manter os valores de referência. Tendo sido este o primeiro ensaio da campanha experimental, é importante referir que, após quatro dias de terem sido colocados na sala húmida, os provetes da mistura C, com traço de 1:6:4 de cimento:terra:brita, apresentavam uma ligeira desagregação, enquanto os restantes provetes encontravam-se sem qualquer alteração.

- **Equipamento e material utilizados:**

- Aparelho de ultra-sons modelo Pundit Lab da marca PROCEQ;
- Balança de precisão 0,1g;
- Gel condutor.

- **Procedimento Experimental:**

- Pesagem dos cilindros;
- Marcação de três pontos em lados opostos da superfície dos cilindros com afastamento de 5 cm da base e do topo e afastados 10 cm entre pontos (assinalada a vermelho na Figura 3.1 a)), sendo um lado denominado de A', B', C' e o outro 1, 2 e 3 e no plano perpendicular F', G', H' e 6, 7 e 8, para além do topo e base, respectivamente T e S.;
- Aplicação de gel condutor para colocação dos transdutores em pontos opostos da superfície do cilindro;
- Leitura dos pontos A'-1 até C'-3 e de F-6 até H-8, efectuando-se três leituras para cada ponto e sendo feitas as leituras através de cruzamento de cada letra com todos os números da face oposta;
- Cálculo do módulo de elasticidade dinâmico através da Equação 3.1 (Whitehurst, 1966):

$$E_d = \frac{V^2 \times \rho \times (1 + \nu) \times (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (3.1)$$

Onde:

$E_d$  – módulo de elasticidade dinâmico [MPa];

$V$  – velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas [km/s];

$M_{ap}$  – massa volúmica aparente do provete [kg/m<sup>3</sup>];

$\nu$  – coeficiente de Poisson.

Para o cálculo do  $E_d$  foi calculada a massa volúmica aparente através do quociente entre a massa de cada provete e o volume do cilindro. O coeficiente de Poisson utilizado foi o valor máximo dentre do intervalo de 0,15 a 0,2 para o betão de agregado corrente, por não haver valor para o betão com terra.

Na Figura 3.1 são apresentados os pontos e planos de medição dos ultra-sons ao longo da altura do provete (a)), assim como dos topos (b)), onde está também incluída o modelo Pundit Lab da marca PROCEQ utilizado.



Figura 3.1 – Pontos e planos de leitura dos ultra-sons sobre provete (a)) e dos topos (b)) e aparelho de ultra-sons (c))

São apresentados no Quadro 3.3 os valores médios e o desvio-padrão das velocidades dos ultra-sons obtidas no ensaio para as diferentes misturas de betão.

Quadro 3.3 – Velocidades de propagação dos ultra-sons para todas as misturas

Betão	Velocidade (m/s)	
	Média	D.P.
A	2412	400
B	2198	444
C	1154	280
P	3433	194

Através da análise dos dados do Quadro 3.3, verifica-se que o maior valor de velocidade se refere ao de betão padrão, verificando-se uma diferença significativa para a mistura A e B. A diferença nos valores pode ser explicada por menor compactação nos provetes de betão com terra, deixando por isso mais vazios na sua constituição. Relativamente ao valor mais baixo da mistura C, em relação às restantes misturas, poderá estar relacionada com o facto de conter maior quantidade de terra na mistura, para além de terem sido detectados “torrões” (grandes aglomerados de terra) após o corte dos mesmos, fazendo com que seja maior o seu volume de vazios.

Como foi referido no início deste ensaio, este ensaio tem como objectivo o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico, sendo ele calculado através das velocidades obtidas através dos tempos medidos pelo aparelho de ultra-sons. São apresentados no Quadro 3.4, os valores médios e desvio-padrão relativos do  $E_d$  para todas as misturas. Considerou-se um coeficiente de Poisson de 0,2, com base no intervalo de valores normalmente usado para o betão de agregado corrente, que se situa no intervalo de 0,15 a 0,20, dependendo da natureza do agregado, da idade do betão e da sua classe de resistência à compressão.

Quadro 3.4 – Valores do módulo de elasticidade dinâmico dos betões

Betão	$E_d$ (MPa)	
	Média	D.P.
A	9236	2293
B	8166	2748
C	2258	1064
P	20433	2234

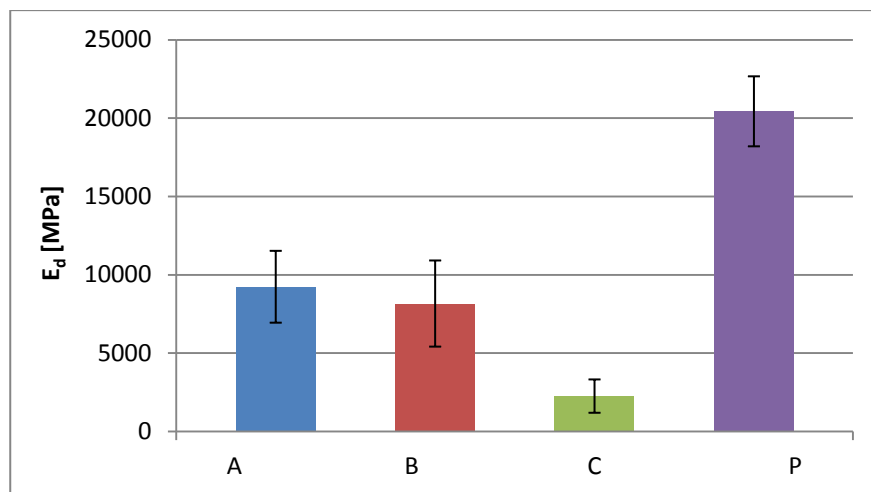


Figura 3.2 – Módulo de elasticidade dinâmico dos betões

Analisando o Quadro 3.4 e a Figura 3.2, conclui-se que o  $E_d$  é mais elevado para o betão padrão, sendo superior ao dobro do valor obtido para os betões A e B. Para as misturas A e B os valores são semelhantes, sendo bastante inferior para a mistura C. O  $E_d$  depende basicamente da pasta de cimento e do agregado, das suas ligações entre partículas e da presença de vazios, afectando assim a sua rigidez e deformabilidade. Perante esta situação, pode-se concluir que o betão C tem uma elevada deformabilidade enquanto que o betão P tem baixa deformabilidade. As misturas A e B terão um comportamento intermédio entre as misturas C e P.

### 3.2.2. Ensaio de condutibilidade térmica

Este ensaio foi realizado com o objectivo de se determinar a condutibilidade térmica ( $\lambda$ ) dos provetes cilíndricos de betão, valores que foram obtidos através do aparelho “ISOMET” expressos em unidades de W/(m.K).

Como já havia sido efectuado para o ensaio de ultra-sons, voltou-se a usar os provetes que se encontravam na sala condicionada, nas condições de humidade relativa de  $65 \pm 5\%$  e  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura, tendo sido novamente colocados na mesma sala após os ensaios, a fim de garantir as condições de equilíbrio com o ambiente.

Os ensaios foram realizados sobre a face lisa do provete, de modo a garantir um melhor contacto entre a sonda e a superfície do cilindro, tendo sido efectuadas três leituras no centro do topo liso de cada provete. Para garantir maior fiabilidade dos valores dados pelo “ISOMET”, foi colocado, por baixo do provete, uma placa de isolamento térmico, no caso específico do ensaio foi usado XPS, para que não houvesse transferência de calor do cilindro para a bancada onde estava a ser realizado o ensaio.



- **Equipamento e material utilizados:**

- ISOMET 2104 com sonda de contacto superficial de 0,3-2,3 [W/(m.K)];
- Placa de isolamento térmico de XPS.

- **Procedimento Experimental:**

- Colocação do cilindro sobre a placa de XPS;
- Colocação da sonda sobre o topo liso do cilindro e efectuada leitura do valor medido;
- Repetição da leitura no mesmo ponto mais duas vezes;
- Após obtenção dos valores de leitura, foi calculada a média e o desvio-padrão de cada cilindro.



Figura 3.3 – Ensaio de condutibilidade térmica

Apresenta-se no Quadro 3.5 os valores médios e os desvios-padrão para a condutibilidade térmica medida para todos os betões.

Quadro 3.5 – Condutibilidade térmica para todos os betões

Betão	Condutibilidade térmica ( $\lambda$ ) [W/(m.K)]	
	Média	D.P.
A	1,40	0,034
B	1,43	0,047
C	1,26	0,124
P	2,12	0,094

Pela análise da Figura 3.4 verifica-se que o betão P apresenta um valor mais elevado em relação aos restantes. O betão C é o que apresenta menor valor de condutibilidade térmica, tendo os betões A e

B valores muito semelhantes. O ensaio de condutibilidade térmica indica que o betão padrão, constituído por agregados de brita e areia e por ter sido melhor compactado, contendo assim menos vazios, faz com que a transmissão de calor através dele seja maior em comparação com os betões constituídos por terra e brita, que contendo mais vazios terá uma menor transmissão de calor. O betão C, como tem maior quantidade de terra, será então o melhor do ponto de vista de comportamento térmico.

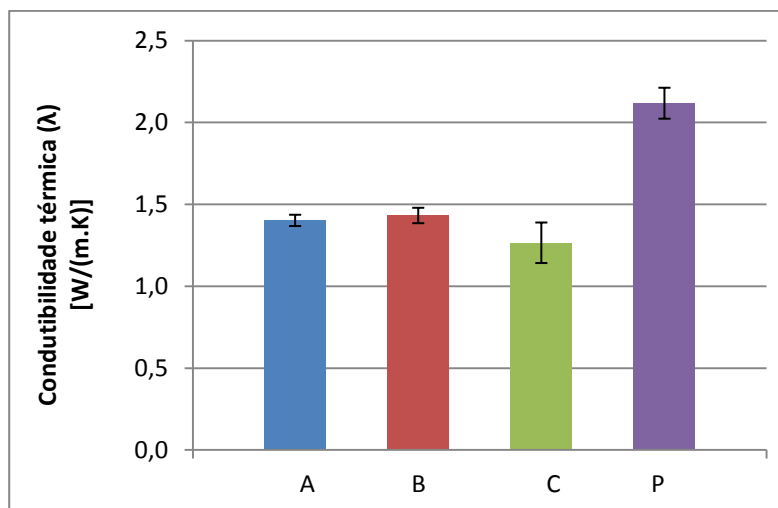


Figura 3.4 – Condutibilidade térmica dos betões

### 3.2.3. Ensaio de dureza superficial

O ensaio do esclerómetro tem como objectivo avaliar a dureza superficial do betão (DS), através do índice esclerométrico, com o qual é estabelecida uma relação com a resistência à compressão do betão. Na realização do ensaio foram feitas leituras sobre os dois topos dos cilindros, usando um esclerómetro pendular, do tipo PT da marca PROCEQ, sendo a sua realização feita na sala condicionada nas condições de humidade relativa de  $65 \pm 5\%$  e de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura, local onde já se encontravam os provetes, que assim garantem as condições recomendadas pela norma EN 12504-2 (2001). As medições efectuadas sobre os dois topos dos cilindros tiveram como objectivo a comparação de valores e identificar diferenças entre eles. São apresentados, no Quadro 3.6, os vários modelos de esclerómetro usados e os materiais a que se destinam.

Quadro 3.6 – Tipos de esclerómetro e suas aplicações (adaptado de (Nepomuceno, 1999))

Tipo de Esclerómetro	Energia de Impacto [N.m]	Aplicação comum
N	2,207	Adequado para betões correntes de edifícios e pontes
NR	2,207	Versão do tipo N com um acessório especial de registo
L	0,735	Adequado para elementos de betão sensíveis ao impacto ou para pedras artificiais

Quadro 3.6 (cont.) – Tipos de esclerómetro e suas aplicações (adaptado de (Nepomuceno, 1999))

Tipo de Esclerómetro	Energia de Impacto [N.m]	Aplicação comum
LR	0,735	Versão do tipo L com um acessório especial e registo
LB	0,735	Adequado para utilização em produtos cerâmicos
M	29,43	Adequado para pavimentos de estradas e pistas de aviação
P	0,883	Adequado para materiais com baixas resistências
PT	0,883	Adequado para materiais com resistências à compressão extremamente baixas (maior área de impacto)

- **Equipamento utilizado:**
  - Esclerómetro pendular do tipo PT da marca PROCEQ.
- **Procedimento Experimental:**
  - Colocação do cilindro sobre superfície rígida para evitar amortecimento do impacto do esclerómetro;
  - Posicionamento do esclerómetro sobre o ponto a medir no topo do cilindro, de modo a garantir perpendicularidade entre a superfície do provete e a do esclerómetro;
  - Encosto do esclerómetro à superfície a ensaiar, libertando o pêndulo;
  - Leitura do valor do ressalto;
  - Repetição do procedimento vinte vezes para o mesmo ponto.

O ensaio de esclerómetro realizado na sala condicionada do laboratório do DEC-FCT/UNL é apresentado na Figura 3.5 o esclerómetro tipo PT utilizado (a)) e (b)).

De acordo com a norma NP EN 12504-2 (2003) (IPQ, 2003) são necessárias, no mínimo, nove leituras dum ponto, tendo sido efectuadas vinte para cada ponto. Foram ensaiados as bases lisa e a rugosa do provete cilíndrico, totalizando quarenta leituras para as duas superfícies. No entanto, houve valores que se afastaram do valor médio, não tendo por isso sido usados para cálculo da média. Segundo a norma, os valores que se afastem mais de seis unidades da média, são automaticamente eliminados, sendo que, se num ponto medido, houver mais de 20% em relação à totalidade da amostra, esse ponto não é contabilizado para cálculo da média. No caso deste ensaio, tendo em conta a ordem de grandeza destes valores, foi decidido alargar-se o critério até às dez unidades.

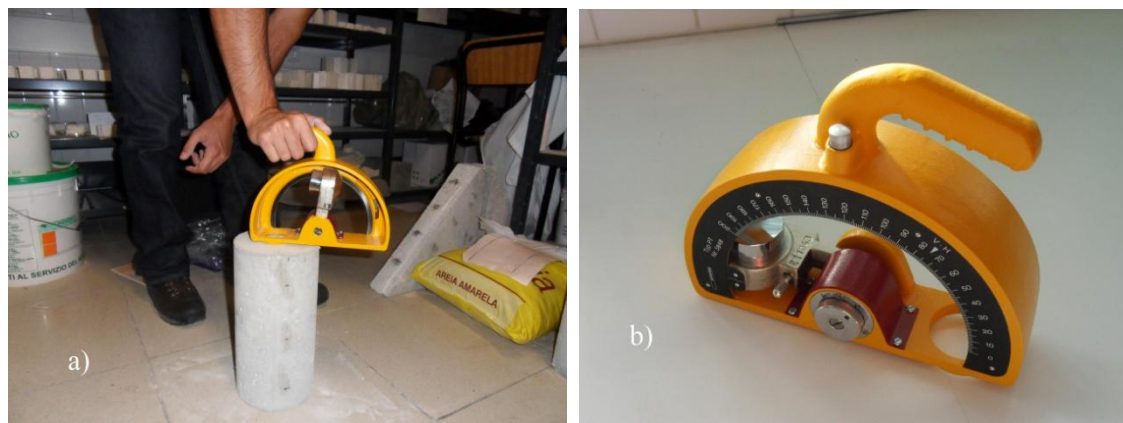


Figura 3.5 – Esclerómetro com provete betão de agregado corrente (a)); Esclerómetro pendular tipo PT (b))

Existiram várias razões para os valores de algumas leituras terem sido descartados, nomeadamente os primeiros de cada provete, por não estarem totalmente compactados, apresentando assim valores mais baixos do que a média. Para além disso, quando foi ensaiada a base lisa, a base rugosa não estava em contacto total com a superfície do pavimento, dando também origem a movimentos do próprio provete durante a medição.

No Quadro 3.7 são apresentados a média e o desvio-padrão da DS, valores que são dados na escala de Vickers, não tendo sido utilizado o ábaco fornecido com o aparelho, que relacionava a dureza com a resistência à compressão do betão.

Quadro 3.7 – Valores médios e desvio-padrão da dureza superficial

Betão	Base Rugosa [Escala Vickers]		Base Lisa [Escala Vickers]	
	Média	D.P.	Média	D.P.
A	111,13	14,16	119,46	9,62
B	119,88	6,06	110,05	10,27
C	71,85	9,96	82,72	10,61
P	130,59	6,98	140,10	3,79

Analisando o Quadro 3.7, verifica-se que o valor mais elevado de dureza é o de betão padrão, sendo que, nos restantes betões com terra, o valor mais elevado é para a base lisa do betão A, e para a base rugosa da mistura B, apresentando valores muito semelhantes para as duas bases e misturas.

O valor mais baixo de dureza superficial de todos os betões analisados é obtido para a mistura C, com esse valor a ser obtido na base lisa.

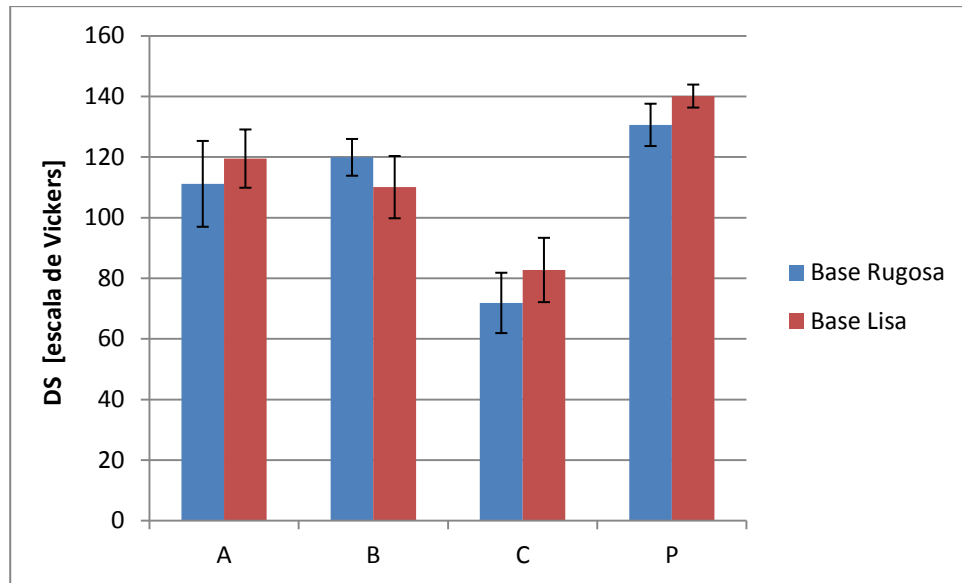


Figura 3.6 – Dureza superficial dos betões

Através da análise da Figura 3.6, verifica-se que o maior valor de desvio-padrão é obtido para a mistura A no topo rugoso, enquanto para o topo liso o máximo pertence à mistura C. Os valores obtidos neste ensaio devem ser analisados de uma forma qualitativa e não quantitativa, por se tratar de um ensaio onde existem diversos factores externos que influenciam a fiabilidade dos resultados.

Após a realização do ensaio, verificou-se que os valores obtidos eram demasiado elevados para o esclerómetro tipo PT utilizado, devendo por isso ter sido utilizado um de tipo L, aparelho que não se encontrava disponível à data da realização do ensaio.

### 3.2.4. Corte dos cilindros para os ensaios

Os cilindros fornecidos pela ESLAM tinham dimensões de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, que foram mantidas para a realização dos ensaios de ultra-sons, condutibilidade térmica e esclerómetro.

Após a realização do ensaio do esclerómetro, os provetes foram cortados de modo a serem realizados os ensaios de capilaridade/secagem e os ensaios mecânicos. Para isso foi utilizada a máquina de corte da marca Norton modelo Clipper Jumbo (Figura 3.7 c)), que apenas alterou a altura inicial de 30 cm, para três novos provetes com 8 cm de altura, com dois deles a serem as bases e um da parte intermédia do provete inicial. Para além dos três cortes mencionados, ainda resultou outro provete com altura de 6 cm, como se pode ver na Figura 3.7.



Figura 3.7 – Provede de betão com terra (mistura B) após corte (a)); Provedes de todas as misturas após corte (b)); Máquina de corte Norton clipper Jumbo (c))

Importa referir que a degradação do provede, após terem sido cortados, revela que quanto menor o teor de ligante, maior a desagregação do betão, como se pode ver na Figura 3.7 b), nomeadamente a mistura C (provedes mais à esquerda na figura). Para além disso, verificou-se também que havia heterogeneidade na composição, com a presença de “torrões”, o que sugere que deviam ter sido desagregados por forma a se obter uma mistura mais homogénea, com o fim de obter resultados mais fiáveis nos ensaios.

Os provedes de betão padrão foram cortados posteriormente, para a realização de outro ensaio que necessitava dos provedes inteiros, mas que não chegou a ser realizado.

### 3.2.5. Ensaio de absorção de água sob baixa pressão através de tubos de Karsten

A utilização de tubos de Karsten, no ensaio de absorção de água sob baixa pressão, tem como objectivo medir a quantidade de água absorvida através de uma área definida sobre um material poroso para um intervalo de tempo estabelecido (RILEM, 1980). Para além de verificar a quantidade de água absorvida, permite também obter o coeficiente de absorção de água aos 60 minutos.

Os provetes de betão com terra foram utilizados já cortados, sendo que os de betão padrão mantiveram as dimensões iniciais, como referido no capítulo anterior.

A aplicação do tubo de Karsten foi feita apenas sobre a face rugosa, por ser essa a face que ficaria virada para o exterior, logo a que estaria sujeita às intempéries. Foi aplicado apenas um tubo por provete numa zona onde não houvesse imperfeições, sendo a sua fixação feita através de plasticina, que mostrou uma excelente aderência ao provete, para além da sua estanquicidade.

Todo o ensaio foi realizado no laboratório do DEC, que apresentava as condições de humidade relativa de 60% e 21°C de temperatura, tendo os provetes permanecido, até à hora de início do ensaio, na sala condicionada com  $65 \pm 5\%$  de humidade relativa e  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura, para onde foram transportados novamente após terem sido testados.

- **Equipamento e material utilizados:**

- Tubo de Karsten graduados com volume de 0 a 4 cm<sup>3</sup>;
- Cronómetro;
- Plasticina para fixação dos tubos.

- **Procedimento Experimental:**

- Colocação do cilindro sobre o apoio, em posição horizontal;
- Fixação dos tubos de Karsten sobre o topo rugoso do cilindro, evitando zonas de imperfeição;
- Enchimento dos tubos até à marca de 0 cm<sup>3</sup> e início da contagem;
- Medição da quantidade de água absorvida aos 5', 10', 15', 30' e 60', sendo repostos o volume de 4 cm<sup>3</sup> sempre que atingia esse volume de absorção.

Na Figura 3.8 apresenta-se o ensaio de absorção de água através dos tubos de Karsten para os provetes de betão com terra (a) e dos de betão padrão (b)).



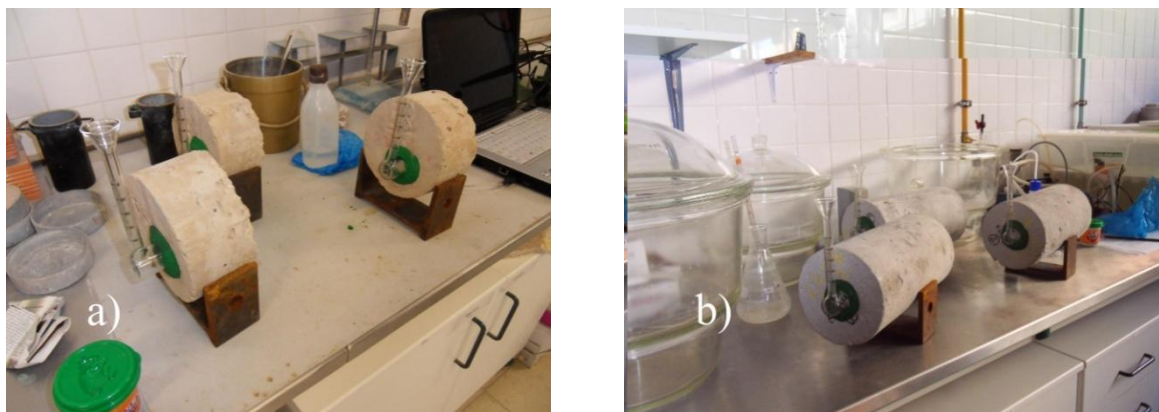


Figura 3.8 – Ensaio tubos de Karsten a decorrer aplicados nos provetes de betão com terra (a)) e betão padrão (b))

São apresentados no Quadro 3.8 e Figura 3.9, os resultados obtidos na absorção de água para o período de 60 minutos, através dos valores médios e dos desvios-padrão de todos os provetes.

Quadro 3.8 – Valores médios e desvios-padrão do volume de água absorvida aos 60 minutos

Volume de água absorvida (kg/m <sup>2</sup> )								
Tempo [min]	Betões							
	A		B		C		P	
	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	0,4	0,57	0,11	2,39	1,05	2,04	0,44
10	1,71	0,5	0,89	0,12	3,85	1,55	3,6	0,36
15	2,42	0,75	1,22	0,2	5	1,91	4,57	0,79
30	4,26	1,5	1,78	0,61	7,36	1,43	7,54	1,07
60	7,39	2,77	2,84	1,33	-	-	12,38	1,41

Para o cálculo do coeficiente de absorção de água, foi consultado o catálogo do fabricante (PROCEQ, 2001) referido por (Flores-Colen, 2009)), de acordo com a Equação 3.2:

$$C_{\text{absorção}} = \frac{X \times 10^{-3}}{d^2 \times \left(\frac{\pi}{4} \times 10^{-6} \times \sqrt{t}\right)} \quad (3.2)$$

Onde:

$C_{\text{absorção}}$  – Coeficiente de absorção de água aos 60 minutos [kg/m<sup>2</sup>\*h<sup>0,5</sup>];

X – Quantidade de água absorvida [ml];

d – diâmetro da superfície em que é feita a penetração da água [mm];

t – duração da leitura [h].



De referir que na equação 3.2 usada para o ensaio foi apenas alterado o tempo de horas para minutos.

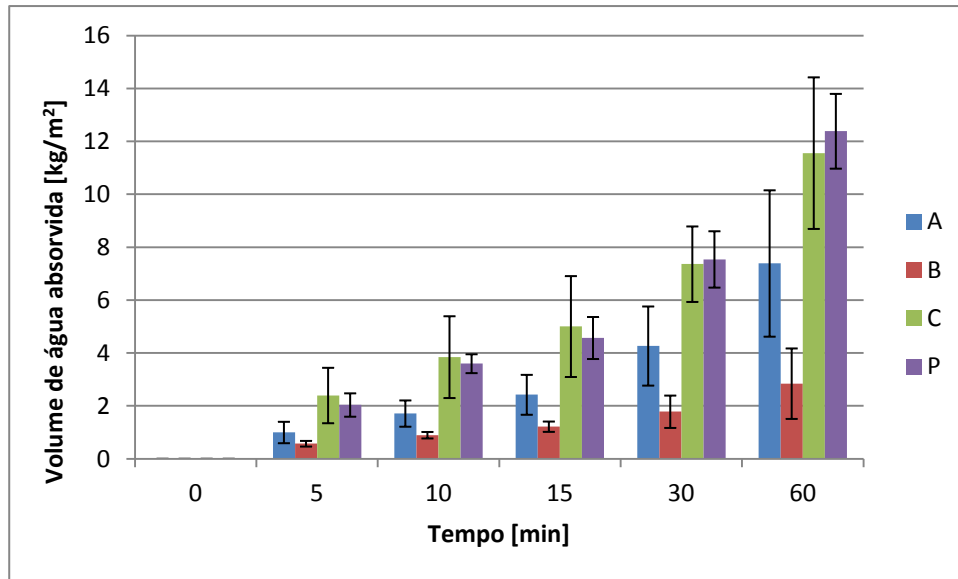


Figura 3.9 – Valores médios e desvios-padrão de absorção de água de todos os provetes

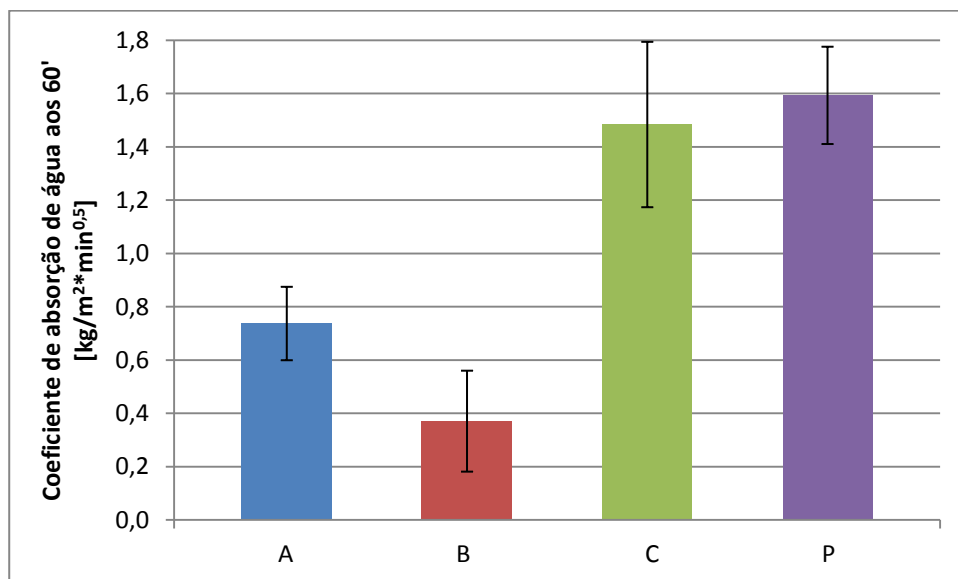


Figura 3.10 – Coeficiente de absorção de água aos 60 minutos

Analisando a Figura 3.9 verifica-se que o betão C absorve bastante mais água que os restantes provetes de betão com terra, apresentando valores aproximadamente o dobro do betão A e sempre superior ao triplo do B. O betão P apresenta comportamento semelhante ao C durante todo o ensaio, sendo que a partir dos 30 minutos começa a absorver maior volume de água que o C. Por o betão C ter menor teor de ligante e maior quantidade de terra na sua constituição, para além da sua pior compactação, implica maior porosidade aberta, explicando assim a maior absorção de água dentro dos betões com terra.

Através da análise das Figuras 3.9 e 3.10, observa-se que a mistura P absorve maior volume de água, apresentando assim o pior comportamento, em termos médios, de todas as misturas. Este comportamento pode ser explicado por um maior porosidade aberta do betão P, que leva a maior absorção de volume de água. Poderá também ser explicado pelo facto de não terem sido cortados os provetes de betão P, que assim contendo maior volume, implicará também maior absorção de água. Entre os provetes de betão com terra a mistura que apresenta melhor comportamento é a B, com uma diferença significativa para as restantes. Já o betão C revela ter o pior desempenho relativamente às misturas A e B, sendo o seu valor próximo do atingido pelo betão padrão.

### **3.2.6. Ensaio de absorção de água por capilaridade**

O ensaio de absorção de água por capilaridade é realizado com o objectivo de se determinar o valor do coeficiente de capilaridade (CC) e o valor assintótico (VA) da curva de absorção de água, permitindo conhecer a velocidade de absorção de água para cada provete, assim como o valor máximo de água absorvida. Para isso são efectuadas medições sucessivas aos provetes em contacto com a água até à sua saturação, altura em que a massa de água se mantém constante e no seu valor máximo, sendo a determinação do CC analisada através do declive inicial da curva de absorção.

Foram usados provetes com dimensões de 15 x 8 [cm], de diâmetro e altura respectivamente, provenientes do corte efectuado após os ensaios não-destrutivos, tendo sido apenas usados o topo liso e um corte intermédio do provete inicial. O total de cilindros ensaiados foi de vinte e quatro, distribuídos igualmente pelas quatro misturas. Esses provetes receberam as denominações de A-1-L e A-1-M até P-3-L e P-3-M, sendo a primeira letra e número referente à mistura e número do provete da mesma, e a letra “L” e “M” referente ao topo liso e corte intermédio do provete inicial. A fim de se realizar este ensaio, foram utilizadas as normas EN 1015-18 (CEN, 2002) e EN 15801 (CEN, 2009), que sendo aplicadas para argamassas houve necessidade de fazer algumas adaptações.

Na preparação dos cilindros foram primeiro envolvidos em película de polietileno à altura total (8 cm), deixando as faces inferior e superior livres. A utilização desta película serve para minimizar a evaporação lateral e garantir a ascensão unidireccional da água durante o ensaio. Após a aplicação do polietileno, foi envolvido a base lisa dos provetes “L” e uma das bases dos “M” com tecido fino, abraçado com um elástico, de modo a garantir a sua correcta fixação à face do cilindro. A face que ficou revestida com o tecido ficou em contacto com a água, tendo o tecido sido aplicado com a finalidade de não haver perda de massa durante o ensaio.

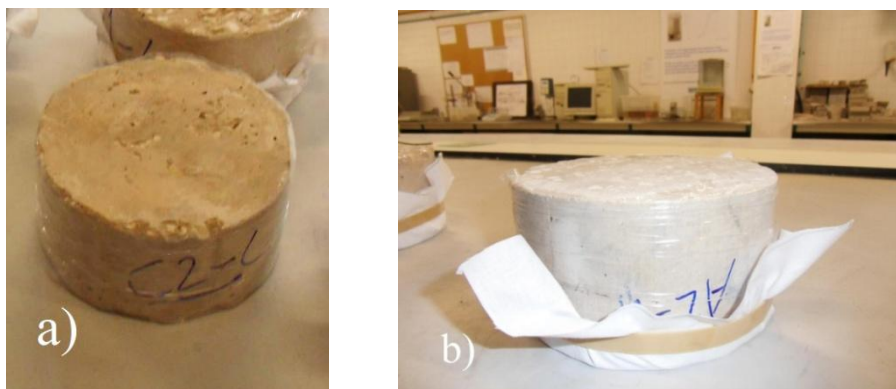


Figura 3.11 – Preparação dos cilindros com película polietileno (a)) e com tecido fino (b))

Após a preparação dos provetes, foram colocados na estufa, à temperatura de 60°C durante 5 dias, cumprindo assim os dois dias de período mínimo para se atingir as condições de massa constante. Terminado o período dentro da estufa, os provetes foram transportados para a sala condicionada, onde se procedeu ao ensaio de capilaridade nas condições de  $65\pm 5\%$  de humidade relativa e  $20\pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura durante todo o ensaio.

- **Material e equipamento utilizados:**

- Película de polietileno;
- Tecido;
- Elásticos;
- Estufa;
- Caixas estanques;
- Tabuleiro com rede plástica;
- Água;
- Nível;
- Régua;
- Balança de precisão 0,001g.

- **Procedimento Experimental:**

- Preparação dos provetes com película de polietileno nas faces laterais, seguida de aplicação de tecido na face inferior, fixado com elástico e colocados na estufa a 60°C durante 5 dias;
- Preparação das caixas estanques com colocação de tabuleiro, rede plástica com nivelamento da altura de água constante de 5 mm acima da rede, com criação de condições de ambiente saturado dentro das caixas;
- Remoção dos provetes da estufa para arrefecerem até atingirem a temperatura ambiente;
- Pesagem dos provetes em balança de precisão 0,001g;

- Colocação, dentro das caixas, de maneira ordenada com intervalo de 20 segundos entre provetes;
- Pesagem dos provetes aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos e de hora a hora até às primeiras 7 horas;
- Realização de nova pesagem às 24h após início do ensaio e novamente às 48h, finalizando assim o ensaio;
- Traçado da curva de absorção, tendo em ordenadas a massa de água absorvida pelo provete por unidade de área [ $\text{kg/m}^2$ ] e, em abcissas, a raiz quadrada do tempo de ensaio;

Os provetes foram colocados dentro das caixas estanques (Figura 3.12 (a)) com 20 segundos de intervalo entre eles, para assim garantir que, no processo de pesagem (Figura 3.12 (c)), todos eles se encontravam com o mesmo tempo de contacto com a água. Durante o ensaio foi mantida a altura de água de 5 mm, com o nível a ser visto através de régua (Figura 3.12 (b)), sendo, por vezes, necessário adicionar água com um esguichador. De modo a assegurar que as condições de saturação eram sempre mantidas, as caixas estiveram sempre fechadas durante o tempo de ensaio. Por estarem a ser realizados ensaios de capilaridade ao mesmo tempo e não haver caixas estanques disponíveis, o ensaio foi realizado, numa 1ª fase, com os provetes de A-1-L até ao C-1-L, com os restantes a serem ensaiados após secagem dos primeiros.



Figura 3.12 – Provetes no ensaio de capilaridade (a)); Verificação do nível de água (b)); Pesagem de provete (c))

Como foi referido, no início deste ensaio, o objectivo é a obtenção do CC, que se traduz na velocidade de absorção de água e o VA, que representa o valor máximo de água absorvida pelo provete. Estes parâmetros são obtidos através da curva de absorção por capilaridade (Figura 3.13), sendo CC e VA indicadores da porosidade e da porometria dos betões estudados. São apresentados, no Quadro 3.9 os valores médios e respectivos desvios-padrão do CC e do VA referentes a todas as misturas.

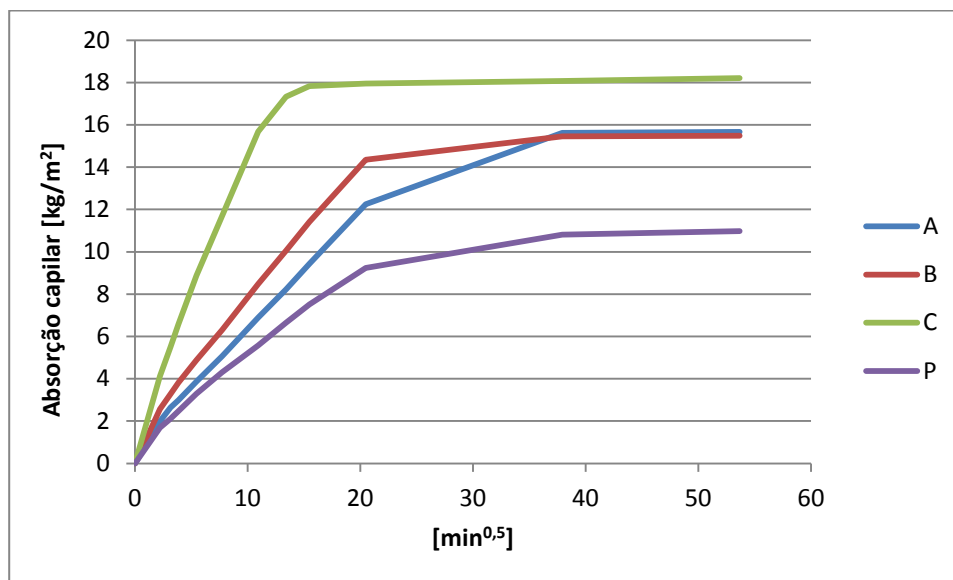


Figura 3.13 – Curva de absorção de água por capilaridade

Quadro 3.9 – Valores médios e desvios-padrão do coeficiente de capilaridade e valor assintótico

Betão	CC [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]	D.P.	VA [kg/m <sup>2</sup> ]	D.P.
A	0,55	0,05	15,66	1,15
B	0,66	0,05	15,49	0,94
C	1,32	0,12	18,21	2,10
P	0,44	0,03	10,98	0,49

Através da análise do Quadro 3.9 e da Figura 3.14 verifica-se que o valor mais elevado é relativo à mistura C, com o seu valor a ser significativamente maior que o das restantes misturas, sendo o seu desvio-padrão também bastante mais alto que os restantes. A mistura P regista o menor valor para o coeficiente de capilaridade, mostrando o melhor comportamento de todas as misturas. As misturas A e B revelam comportamentos semelhantes e ligeiramente mais elevados que o da mistura P, sendo os seus valores de desvio-padrão bastante baixos. Pela análise dos resultados da Figura 3.14 o betão P apresentará a menor porometria, reflectindo-se na menor velocidade de absorção de água. Comportamento oposto apresenta o betão C, com uma diferença significativa em comparação com os restantes.

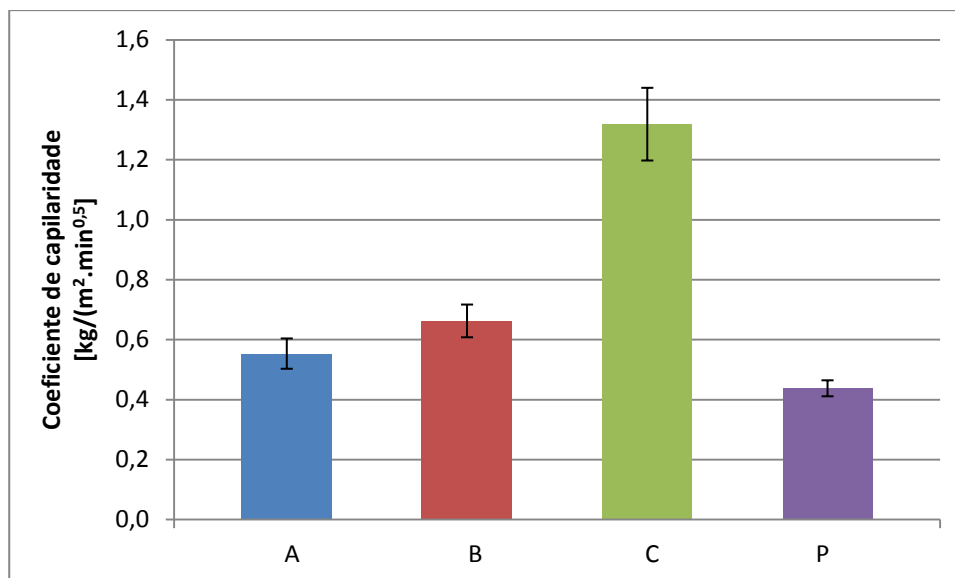


Figura 3.14 – Coeficiente de capilaridade dos betões

Analisando a Figura 3.15 e o Quadro 3.9, o VA mais elevado é referente à mistura C, voltando a apresentar o pior comportamento em relação à absorção de água de todos os betões. O betão C por ter maior quantidade de terra na sua constituição e pior compactação do betão apresenta maior porosidade, fazendo com que absorva maior volume de água. A mistura P tem o menor VA, com uma diferença significativa em relação às misturas B e C, verificando-se então que a substituição de parte do agregado por terra se reflecte num comportamento mais fraco em termos de absorção de água. O comportamento do betão P pode-se justificar pela menor porosidade apresentada pelo agregado fino (areia) e da sua melhor compactação quando comparada com os de betão com terra. As misturas A e B têm valores similares, mantendo-se o comportamento intermédio entre as misturas C e P, já analisada para o CC.

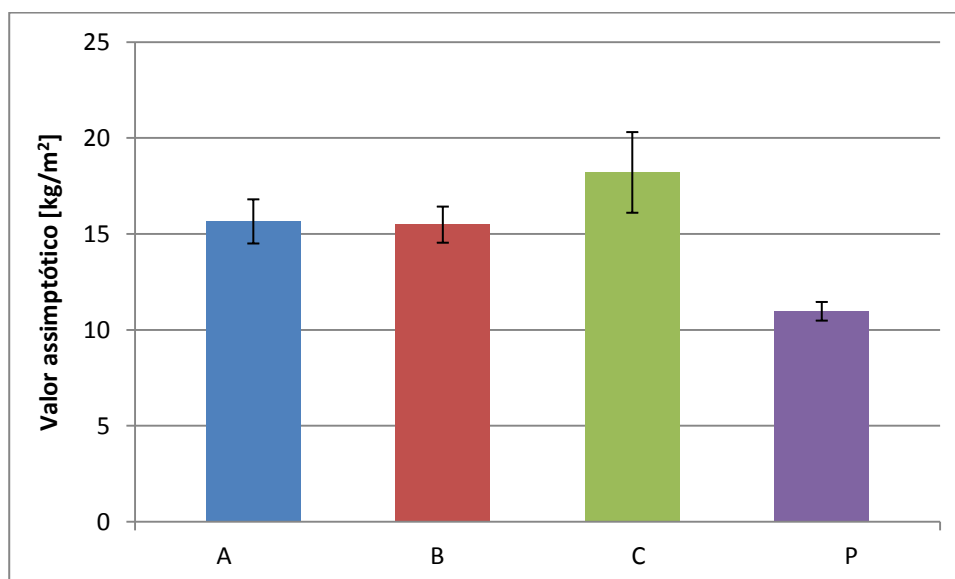


Figura 3.15 – Valor assintótico dos betões

### 3.2.7. Ensaio de secagem

O ensaio de secagem é realizado logo após o de absorção de água por capilaridade, por se estar perante um teste que simula as condições naturais de absorção de água e a sua posterior secagem, resulta num processo cíclico e que está obrigatoriamente associado, não devendo ser realizado as duas fases de forma independente.

Deste modo, o seu início coincide com a última medição feita no ensaio de absorção de água por capilaridade, aproveitando assim o facto dos provetes se encontrarem próximos da saturação capilar (Figura 3.16).

O estudo deste processo, em materiais porosos realizados em laboratório em condições controladas, obtém-se experimentalmente através da curva de secagem (Figura 3.17). O objectivo é, por isto, a obtenção das curvas de secagem, das quais se calculará o índice de secagem (IS) e a taxa de secagem (TS). O IS reflecte o comportamento do provete a longo prazo, enquanto a TS traduz a velocidade inicial de secagem.

Este ensaio tem como base o procedimento No II.5 “Evaporation Curve” da RILEM (1980), sendo que, para o cálculo do IS, foi usado o método descrito por Brito (Brito, et al., 2011) e na norma italiana NORMAL 29/88 (CNR/ICR, 1991), que utiliza o método simplificado de integração numérica feita através da soma sucessiva de trapézios, de modo que um valor mais baixo do índice obtido se traduzirá numa secagem mais fácil. Para a obtenção da TS recorre-se ao declive da recta tangente ao troço inicial da curva de secagem, resultando numa secagem mais célere na fase inicial se o valor obtido for maior.



Figura 3.16 – Secagem dos provetes de betão com terra (a)),(b))

O ensaio de secagem foi realizado na sala condicionada com as condições de  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  de temperatura e  $65\pm 5\%$  de humidade relativa.

- **Equipamento utilizado:**
  - Bancada impermeável;
  - Balança de precisão 0,001g.
- **Procedimento Experimental:**
  - Terminada a última pesagem do ensaio de capilaridade, retiraram-se os provetes do contacto com a lâmina de água;
  - Colocação dos provetes sobre a bancada impermeável, tendo-se efectuado uma pesagem por hora durante as primeiras 6h desde o início do ensaio;
  - Realização de pesagens diárias durante os cinquenta e um dias seguintes, totalizando mil duzentas e vinte e quatro horas;
  - Terminado o ensaio, foi traçada a curva de secagem e calculada a taxa de secagem, obtida através do declive inicial da recta da curva de secagem;
  - Cálculo do teor em água ( $\omega$ ), através da Equação 3.3 e índice de secagem (IS) através do método simplificado de integração numérica por (Grilo, et al., 2014) - (Brito, et al., 2011) de acordo com a Equação 3.4.

$$\omega_i = \frac{m_i - m_0}{m_0} \quad (3.3)$$

Onde:

$\omega_i$  – teor em água no instante  $t_i$  [%];

$m_i$  – massa do provete no instante  $t_i$  [g];

$m_0$  – massa do provete seco [g].

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^n [(t_i - t_{i-1}) \times \left( \frac{\omega_{t_{i-1}} + \omega_{t_i}}{2} \right)]}{\omega_{máx} \times t_f} \quad (3.4)$$

Onde:

IS – índice de secagem;

$t_i$  – tempo de ensaio decorrido até ao instante  $i$  [h];

$t_{i-1}$  – tempo de ensaio decorrido até instante anterior a  $i$  [h];

$\omega_{t_i}$  – teor em água no instante  $i$  [%];

$\omega_{máx}$  – teor máximo de água do provete para o instante inicial [%];

$t_f$  – tempo total de ensaio [h].

São apresentados no Quadro 3.10 os valores relativos às médias e desvios-padrão obtidos para todas as misturas da taxa de secagem (TS) e do índice de secagem (IS).



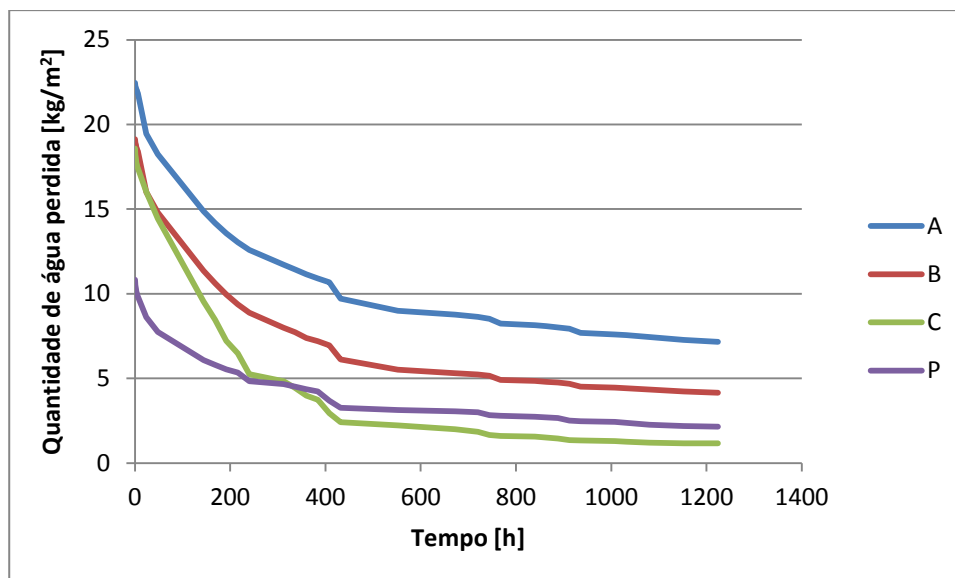


Figura 3.17 --- Curvas de secagem

Quadro 3.10 – Médias e desvios-padrão da taxa de secagem e índice de secagem

Betão	Taxa de secagem [kg/m²*h]		Índice de secagem	
	Média	D.P.	Média	D.P.
A	0,16	0,02	0,43	0,03
B	0,16	0,01	0,34	0,01
C	0,26	0,03	0,16	0,02
P	0,20	0,01	0,31	0,04

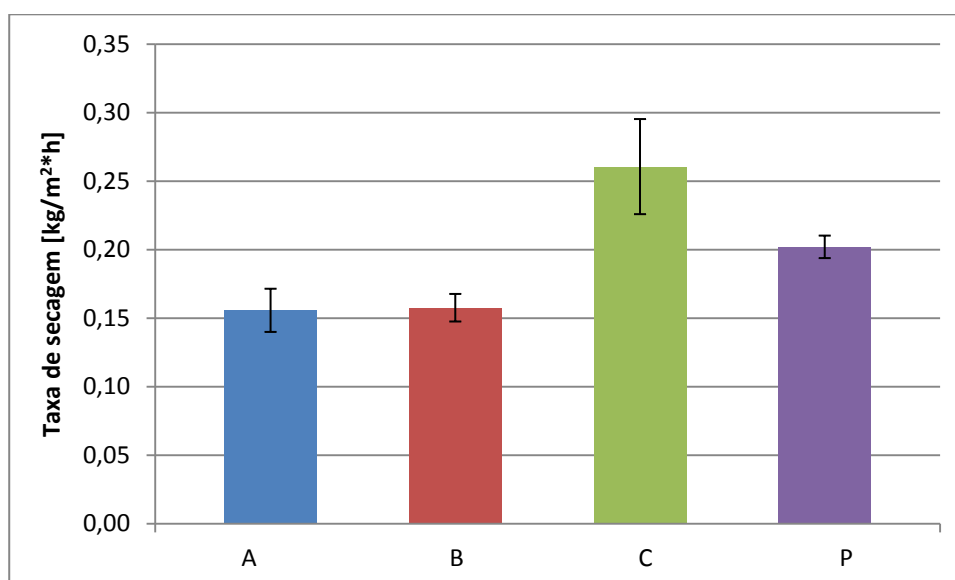


Figura 3.18 – Taxa de secagem dos diferentes betões

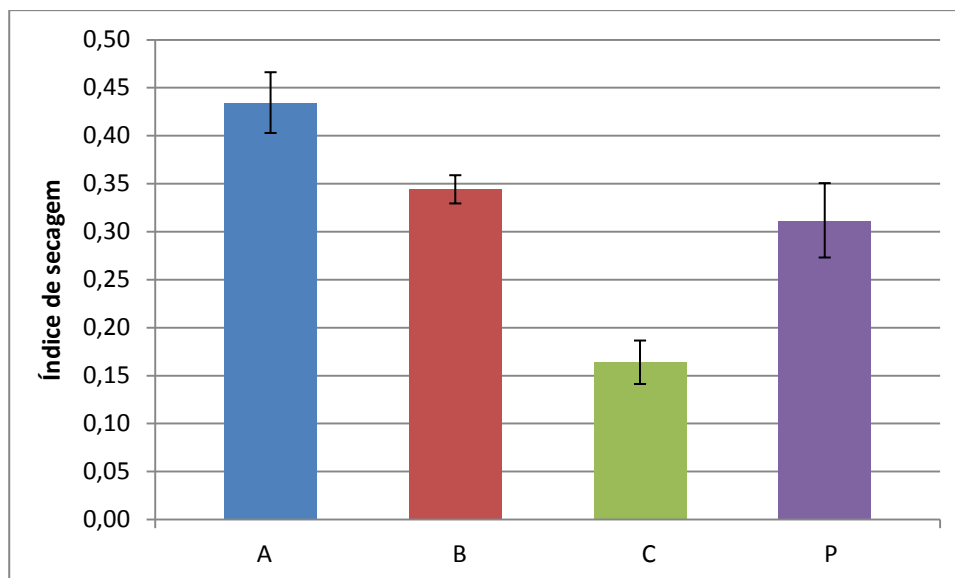


Figura 3.19 – Índice de secagem dos diferentes betões

Analisando o Quadro 3.10 e a Figura 3.18, conclui-se que o betão C apresenta a maior TS, traduzindo-se numa maior velocidade inicial de secagem, reflectindo-se num melhor comportamento de evaporação da água presente no material. Contrastando com o betão C encontram-se os betões A e B, que apresentam o menor valor da TS.

Relativamente ao IS, o betão que regista o menor valor é o C, mantendo o melhor comportamento de todos, visto o IS traduzir a facilidade de um material perder água, o seu menor valor irá apresentar o melhor comportamento, sendo que o betão A, neste caso, apresenta o maior valor (Figura 3.19).

### 3.2.8. Ensaio de compressão diametral

O ensaio de resistência à compressão diametral foi realizado na máquina ZWICK/ROELL (Figura 3.20) modelo Z050, com uma célula de carga de 50kN, instalada no laboratório do DEC. Para a sua realização foi considerada como base a norma NP EN 12390-3:2003 (IPQ, 2003) para betão endurecido. Foram utilizados os provetes de 8 cm ensaiados à capilaridade e à secagem da zona intermédia do provete inicial de todas as misturas, com denominação “M”, já referidos no 3.2.6. Os topos de 8 cm que não foram utilizados no ensaio de capilaridade de betão com terra e padrão também foram testados. Ensaaiaram-se no total 24 provetes, todos com as dimensões de 15x8 [cm] de diâmetro e altura respectivamente, sendo 18 deles de betão com terra.

- **Equipamento utilizado:**

- Máquina universal ZWICK/ROELL modelo Z050;
- Célula de carga de 50 kN.

• **Procedimento Experimental:**

- Limpeza da superfície e remoção de qualquer resíduo ou material estranho do aparelho e provete;
- Posicionamento dos provetes, de modo a que a carga seja aplicada perpendicularmente à direcção da moldagem;
- Colocação da célula de carga na máquina ZWICK/ROELL para realização do ensaio;
- Colocação do provete na máquina ZWICK/ROELL;
- Levar provete à ruptura, através da obtenção da carga máxima à rotura,  $F$  [N];
- Determinação do valor da resistência,  $f_{ct}$  [MPa], através do quociente entre a carga máxima à rotura,  $F$  [N] e a área de contacto do provete, através da Equação 3.4.

A determinação da resistência à compressão foi calculada através da norma NP EN 12390-6 (IPQ, 2003) com a seguinte fórmula:

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (3.5)$$

Onde:

$f_{ct}$  – resistência à tracção por compressão [MPa];

$F$  – carga máxima [N];

$L$  – comprimento da linha de contacto do provete [mm];

$d$  – dimensão da secção transversal designada [mm].



Figura 3.20 – Máquina universal ZWICK/ROELL (a)); provete a ensaiar (b))



Figura 3.20 (cont.) –Provete de betão com terra após rotura (c))

Apresentam-se, nos Quadro 3.11 e 3.12, os valores referentes à carga máxima ( $F$ ) e à resistência à compressão diametral ( $f_{ct}$ ) de todos os betões. Não há registo dos valores obtidos para o betão P devido a questões técnicas.

Quadro 3.11 – Médias e desvios-padrão da carga máxima e resistência à tracção por compressão

Betão	F [N]		$f_{ct}$ [MPa]	
	Média	D.P.	Média	D.P.
A	15507	3013	0,82	0,16
B	13589	1941	0,72	0,10
C	2484	655	0,13	0,03

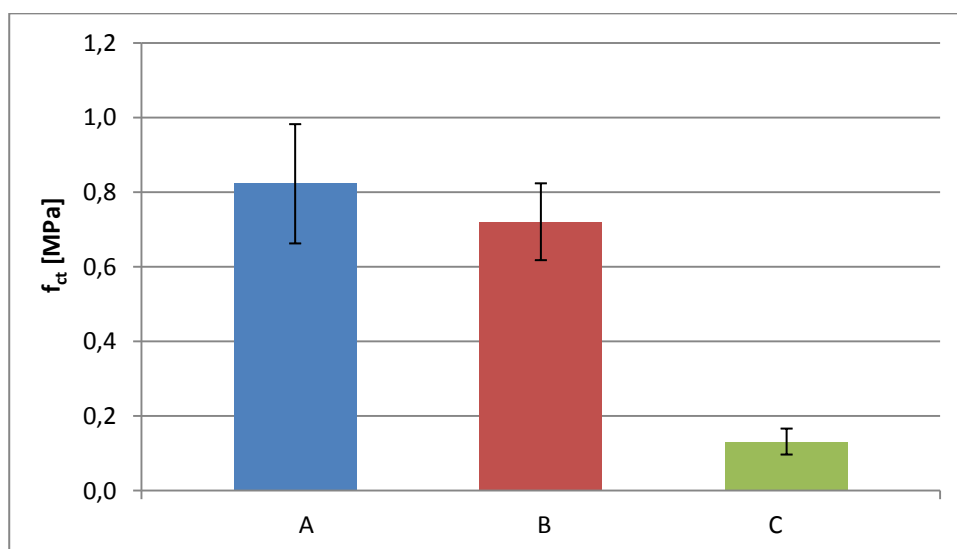


Figura 3.21 – Resistência à compressão diametral dos diferentes betões

Pela análise feita ao Quadro 3.11 e Figura 3.21, verifica-se que o betão A tem o valor mais elevado de resistência à tracção por compressão ( $f_{ct}$ ). O betão A apresenta valores semelhantes aos do betão B. De todos eles, o betão C é o que exibe pior comportamento.

É importante clarificar que o ensaio em causa tinha dois tipos de provetes, já referidos no início deste sub-capítulo, metade são provetes provenientes do ensaio de capilaridade e os restantes não sujeitos ao mesmo ensaio, perfazendo vinte e quatro no total. Mostra-se nos Quadros 3.12 e 3.13 e na Figura 3.22 os valores médios e desvios-padrão obtidos para a carga máxima e resistência à compressão diametral dos betões com terra antes e após terem estado em contacto com a água, denominados de “CAP” a seguir à respectiva mistura.

Quadro 3.12 – Médias e desvios-padrão da carga máxima com e sem contacto com a água

Betão	F [N]		Betão	F [N]	
	Média	D.P.		Média	D.P.
A	13217	2116	A (CAP)	17796	1577
B	13070	1306	B (CAP)	14108	2627
C	2045	627	C (CAP)	2924	318

Quadro 3.13 – Médias e desvios-padrão da resistência à compressão diametral com e sem contacto com a água

Betão	$f_{ct}$ [MPa]		Betão	$f_{ct}$ [MPa]	
	Média	D.P.		Média	D.P.
A	0,70	0,11	A (CAP)	0,94	0,08
B	0,69	0,07	B (CAP)	0,75	0,14
C	0,11	0,03	C (CAP)	0,16	0,04

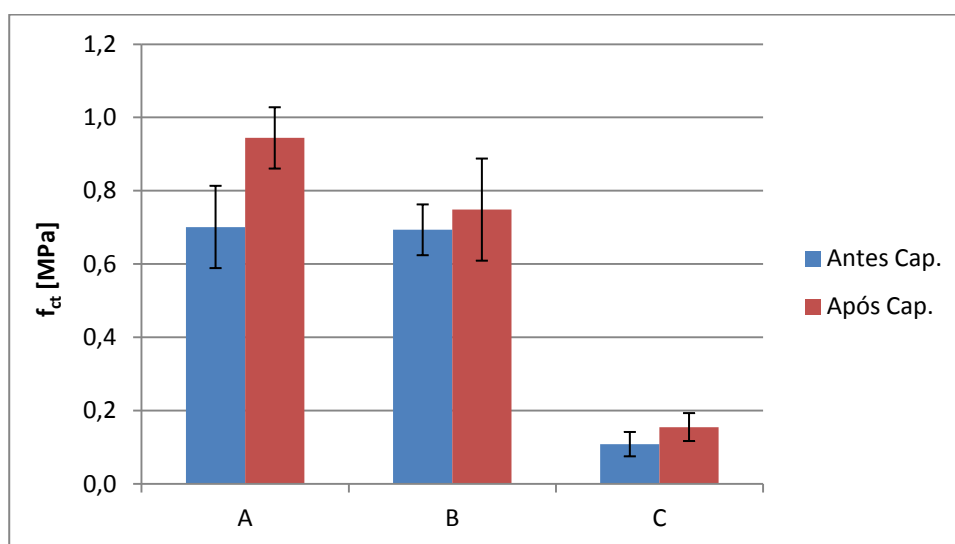


Figura 3.22 – Resistência à compressão diametral dos diferentes betões antes e após o ensaio de capilaridade

Analisando o Quadro 3.13 e a Figura 3.22, conclui-se que os valores de resistência obtidos são superiores após o ensaio de capilaridade. Verifica-se também que o valor mais elevado é obtido para a betão A e o mais reduzido para o betão C. Os valores obtidos para os betões com terra são ligeiramente inferiores quando não sujeitos ao contacto com a água, que poderá estar relacionado com

a ocupação de alguns vazios com água, aumentando assim antevendo poucas alterações no seu comportamento mecânico.

### 3.2.9. Ensaio de compressão uniaxial

O ensaio de resistência à compressão uniaxial foi realizado na prensa W+B Modelo PKNS 19D do Laboratório de Estruturas do DEC/FCT-UNL. Segundo a norma NP EN 12390:3 (2003) (IPQ, 2003) para betão endurecido. Foram utilizados os provetes das bases lisas usados no ensaio de capilaridade e secagem, com 8 cm de altura, denominados de “A-1-L”, como exemplo, sendo a primeira letra referente à mistura, o número é relativo ao provete da mistura e o “L” referente ao topo liso. Para além destes, foram também ensaiados os provetes de 6 cm, sendo que estes não tiveram contacto com a água. No total, foram utilizados 24 provetes, 12 deles com dimensões de 15x8 [cm], assim como outros 12 com dimensões de 15x6 [cm], sendo 18 deles de betão com terra.

- **Equipamento utilizado:**
  - Prensa W+B modelo PKNS 19D;
- **Procedimento Experimental:**
  - Limpeza da superfície e remoção de resíduos ou material estranho do aparelho e provete;
  - Posicionamento dos provetes, de modo a que a carga seja aplicada paralelamente à direcção da moldagem;
  - Colocação de acessórios e célula de carga na prensa, para realização do ensaio;
  - Colocação do provete na prensa;
  - Obtenção da carga máxima à rotura,  $F$  [N].

A determinação do valor da resistência,  $f_c$  [MPa], é obtida através do quociente entre a carga máxima à rotura,  $F$  [N] e a área de secção transversal do provete,  $A_c$  [mm<sup>2</sup>] segundo a equação 3.6 (IPQ, 2003):

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.6)$$

Onde:

$f_c$  – Resistência à compressão [MPa];

$F$  – Carga máxima à rotura [N];

$A_c$  – Área de secção transversal do provete na qual a força compressão é aplicada.

São apresentados na Figura 3.21 a prensa utilizada no ensaio (a)), assim como um ensaio sobre um provete de betão com terra (b)) e um provete de betão com terra após ter sido ensaiado (c)).

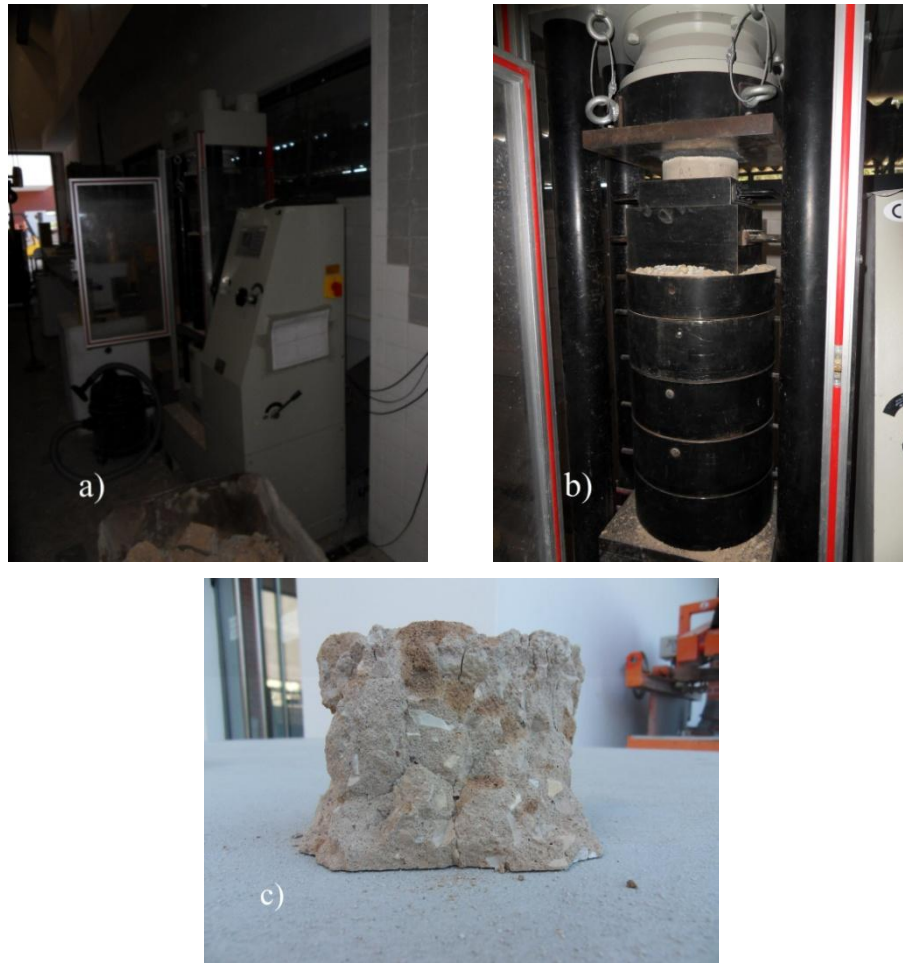


Figura 3.23 – Prensa W+B Modelo PKNS 19D (a)), Ensaio de provete de betão com terra (b)); Provete de betão com terra após rotura (c))

Apresenta-se no Quadro 3.14 e na Figura 3.24 os valores relativos à resistência à compressão dos provetes de 8 cm que tiveram em contacto com a água.

Quadro 3.14 – Valores médios e desvios-padrão da carga máxima e da resistência à compressão uniaxial dos vários betões de 8 cm

Betão	F [N]		f <sub>c</sub> [MPa]	
	Média	D.P.	Média	D.P.
A	291	24	16,47	1,38
B	232	5	13,11	0,29
C	42	6	2,38	0,34
P	593	15	33,58	0,82

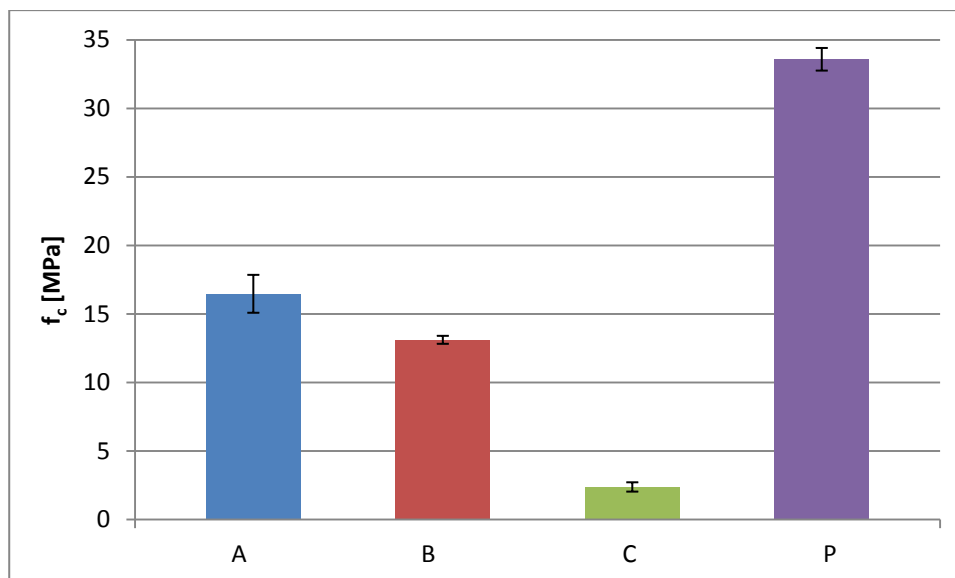


Figura 3.24 – Resistência à compressão uniaxial dos vários betões de 8 cm

Analisando o Quadro 3.14 e a Figura 3.24, observa-se que o valor de resistência mais elevado pertence ao betão P, sendo o seu valor mais do dobro do atingido pelo betão com terra mais resistente, o betão A. A mistura C apresenta o menor valor de todos eles, sendo bastante inferior aos dos restantes provetes, sendo cerca de oito vezes menor que a mistura A e seis que a B. Os valores obtidos para  $f_c$  podem ser comparados com os VA obtidos, concluindo que para maiores valores assintóticos (betão C) menor a resistência à compressão. O melhor comportamento obtido pelo P em termos de resistência contrasta com o menor VA obtido, encontrando-se os betões A e B numa situação intermédia. Nesta análise comparativa, pode-se concluir que a água absorvida durante o ensaio de capilaridade que depois se perdeu no ensaio de secagem, retirou resistência ao betão. Fazendo a analogia com mecânica dos solos, a pressão intersticial criada pela absorção de água faz aumentar a tensão total do betão e, quando libertada essa mesma massa de água, a tensão efectiva suportada pelo betão fica bastante reduzida.

Seguidamente apresenta-se, no Quadro 3.15 e na Figura 3.25, os valores da carga máxima (F) e de resistência à compressão relativos aos provetes de 6 cm, provetes estes que não foram sujeitos ao ensaio de capilaridade.

Quadro 3.15 – Valores médios e desvios-padrão da carga máxima e da resistência à compressão uniaxial dos vários betões de 6 cm

Betão	F [N]		$f_c$ [MPa]	
	Média	D.P.	Média	D.P.
A	399	26	22,58	1,50
B	249	36	14,09	2,06
C	49	8	2,79	0,43
P	769	43	43,52	2,41



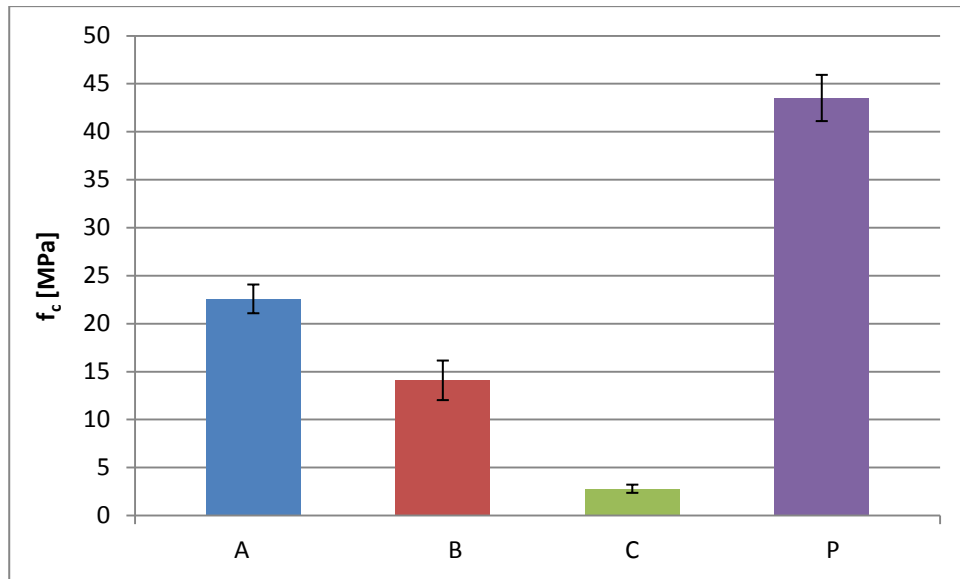


Figura 3.25 – Valores de resistência à compressão uniaxial dos vários provetes de 6 cm

Analisando o Quadro 3.15 e a Figura 3.25, verifica-se que, novamente, o betão P apresenta o valor mais elevado de resistência, sendo também aproximadamente o dobro da atingida pelo betão com terra mais resistente, da mistura A. Existe agora uma diferença maior entre os betões A e B relativamente aos de 8 cm, de cerca de 60%, enquanto que no caso dos outros provetes a diferença se situava em 25,6%. O betão C volta a apresentar o valor mais baixo de todos, sendo agora a diferença, para os restantes betões com terra, de sete vezes para o B e dez para o A.



## 4. Discussão de resultados

Apresenta-se neste capítulo a análise global feita aos resultados obtidos em todos os ensaios realizados na campanha experimental, e sobre a qual foram apenas apresentados os resultados individuais relativos a cada ensaio. Este capítulo está organizado com todos os resultados obtidos no comportamento à acção da água, assim como os parâmetros físicos e mecânicos, sendo feita a análise comparativa entre eles. Os resultados obtidos na campanha experimental serão comparados com os obtidos pela colega Cátia Abreu do MIEC (Abreu, 2013).

### 4.1 Comportamento face à acção da água

O estudo do comportamento face à acção da água e da humidade tem uma grande importância para o conhecimento do betão, e foi com esse objectivo que, na campanha experimental, foram realizados os ensaios de absorção de água sob baixa pressão, a absorção de água por capilaridade e secagem. O comportamento ideal de um betão face à acção da água passa por ter uma baixa absorção e que a mesma seja feita de forma lenta. No que, à secagem se refere, pretende-se que o material tenha uma perda rápida de água na fase inicial e que a massa de água absorvida seja perdida na maior quantidade possível. Transpondo agora para os ensaios realizados o que foi referido no parágrafo anterior, corresponde a um baixo valor de absorção de água e do coeficiente de absorção de água aos 60', relativamente à absorção de água sob baixa pressão. Para o ensaio de capilaridade pretende-se obter um valor assintótico baixo, o que se reflecte numa baixa massa de água absorvida pelo material, para além de um coeficiente de capilaridade baixo, que traduz a velocidade de absorção de água pelo provete. No que se refere à secagem, para se obter de forma rápida, a perda de massa de água por evaporação vai-se reflectir numa taxa de secagem elevada, contrastando assim com um índice de secagem baixo, valor que traduz a facilidade de perda de massa de água por parte do provete. São apresentados, nos Quadros 4.1 e 4.2, os valores obtidos para os ensaios face à acção da água da presente tese e da colega Cátia Abreu (Abreu, 2013).

Quadro 4.1 – Resultados dos vários ensaios face à acção da água

Ensaio	Betão							
	A		B		C		P	
	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
Volume de água absorvida sob baixa pressão aos 60' [kg/m <sup>2</sup> ]	7,39	2,77	2,84	1,33	11,56	2,87	12,38	1,41
Coeficiente de absorção água aos 60' [kg/m <sup>2</sup> *min <sup>0,5</sup> ]	0,74	0,14	0,37	0,19	1,48	0,31	1,59	0,18
CC [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]	0,55	0,06	0,67	0,04	1,37	0,20	0,48	0,02
VA [kg/m <sup>2</sup> ]	12,25	0,36	14,34	0,32	17,95	0,77	9,23	0,16
TS [kg/m <sup>2</sup> *h]	0,09	0,01	0,12	0,00	0,21	0,03	0,18	0,01
IS	0,43	0,03	0,34	0,01	0,16	0,02	0,31	0,04

Quadro 4.2 – Resultados dos vários ensaios face à acção da água (Abreu, 2013)

Ensaio	Betão (Valores Cátia Abreu)							
	A		B		C		P	
	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
Volume de água absorvida sob baixa pressão aos 60' [kg/m <sup>2</sup> ]	11,16	2,65	9,46	3,14	14,94	3,87	9,58	2,05
Coefficiente de absorção água aos 60' [kg/m <sup>2</sup> *min <sup>0,5</sup> ]	1,79	0,41	1,43	0,38	2,39	0,88	1,36	0,30
CC [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]	0,69	0,01	0,69	0,06	1,25	0,10	0,60	0,08
VA [kg/m <sup>2</sup> ]	12,36	1,70	11,15	0,36	11,76	0,26	8,58	0,04
TS [kg/m <sup>2</sup> *h]	0,09	0,02	0,10	0,00	0,11	0,01	0,07	0,00
IS	0,32	0,04	0,26	0,02	0,17	0,03	0,33	0,03

Onde:

CC – Coeficiente de capilaridade;

VA – Valor assintótico;

TS – Taxa de secagem;

IS – Índice de secagem.

A – traço 1:3:1 [cim:terra:brita];

B – traço 1:3:2 [cim:terra:brita];

C – traço 1:6:4 [cim:terra:brita];

P – traço 1:2:2 [cim:areia:brita]

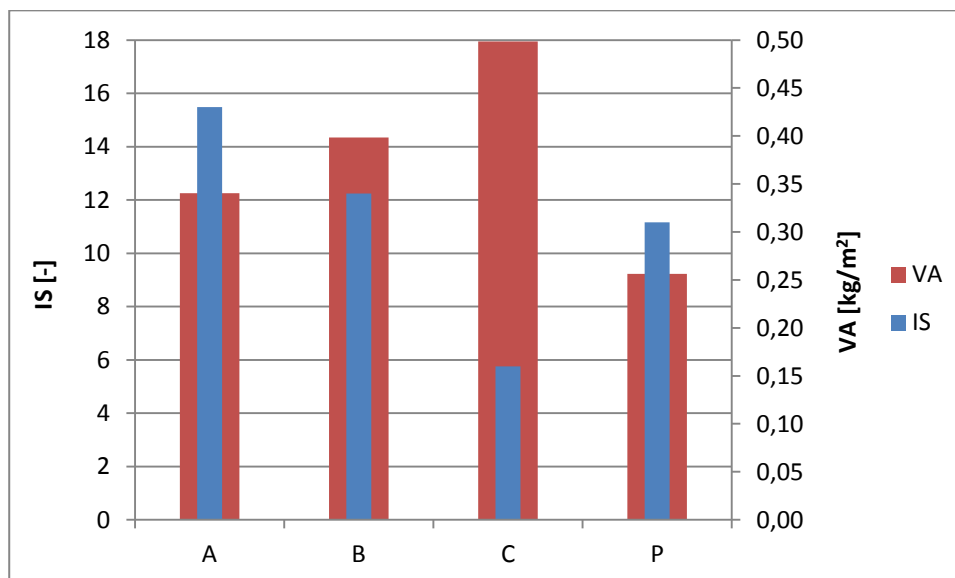


Figura 4.1 – Índice de secagem e valor assintótico

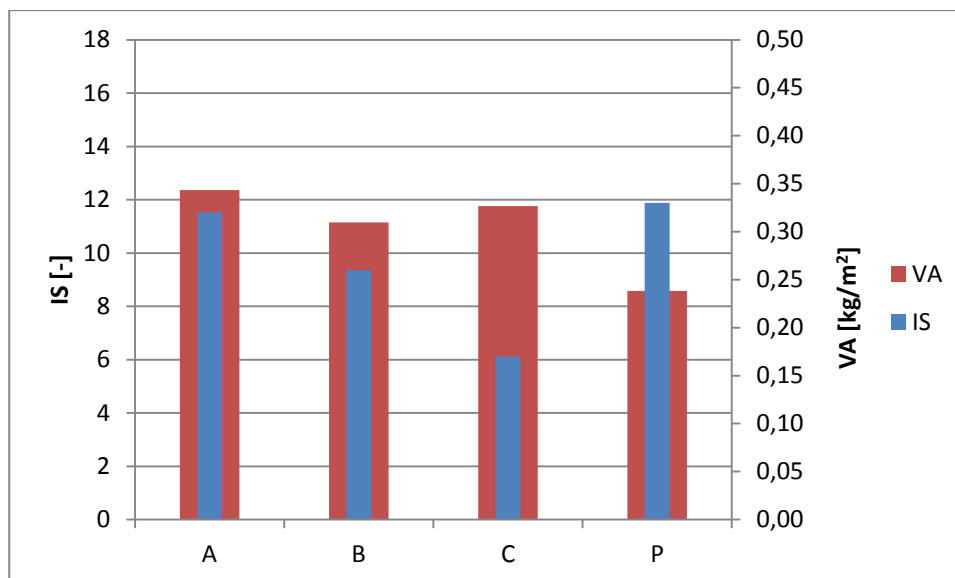


Figura 4.2 - Índice de secagem e valor assintótico (Abreu, 2013)

Analisando os Quadros e as Figuras 4.1 e 4.2, verifica-se que o betão A dos provetes cilíndricos e o P dos laminares apresentam os valores mais elevados do IS, resultando no comportamento mais fraco em termos da velocidade de perda de água. Contrastando com os anteriores, encontra-se o betão C que contém o valor mais baixo de IS para todos os provetes, apresentando assim o melhor comportamento de todos. Os resultados para o IS entre provetes cilíndricos e laminares foi de aproximadamente 34% para o betão A, 31% para o betão B, 6% para C e de 6% para P.

No que ao VA se refere, a análise das figuras e quadros permite concluir que, para os cilindros, o valor mais elevado é o do C enquanto, nas lajetas, esse valor pertence à mistura A. Resultam então os piores comportamentos em termos de absorção de massa de água para estes provetes, visto serem os que absorvem maior volume da mesma. No lado oposto, encontra-se o betão P, que apresenta o melhor comportamento para os dois tipos de provetes. A mistura B apresenta sempre o comportamento mais equilibrado de todos os betões, apontando assim para que a sua mistura seja a mais próxima do ideal em termos de absorção e perda de massa de água.

Comparando, para a mesma mistura, os valores de IS e VA, verifica-se que o que tem menor valor de VA, tem o maior valor de IS (betão C), existindo um comportamento contrário relativo à absorção e evaporação de água, visto esta mistura absorver um grande volume de água, mas ao mesmo tempo, consegue perdê-lo rapidamente no processo de secagem inicial.

São apresentados nas Figuras 4.3 e 4.4 a comparação entre os valores registados do coeficiente de capilaridade (CC) e da taxa de secagem (TS), respectivamente obtidos no âmbito desta dissertação e nos da colega Cátia Abreu (Abreu, 2013).

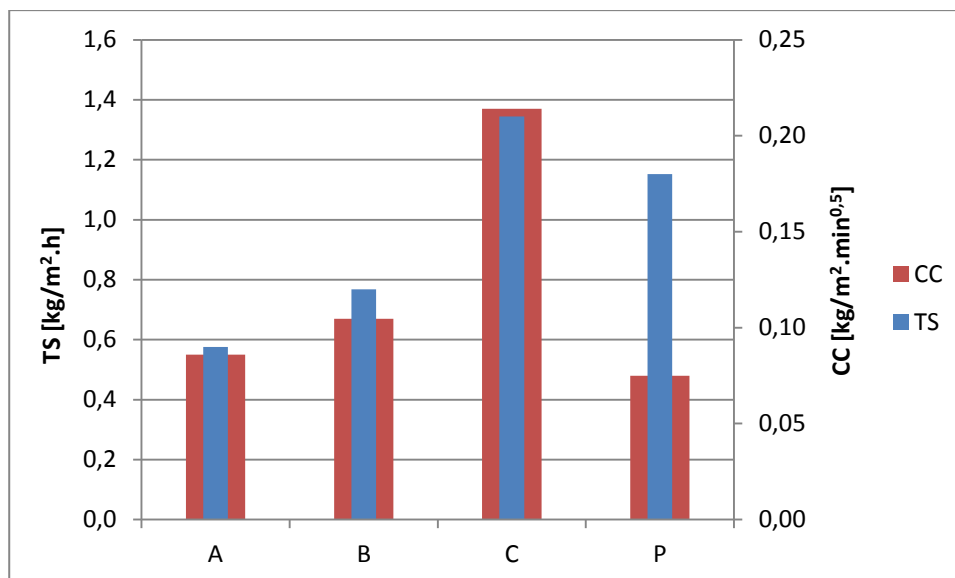


Figura 4.3 – Taxa de secagem e coeficiente de capilaridade

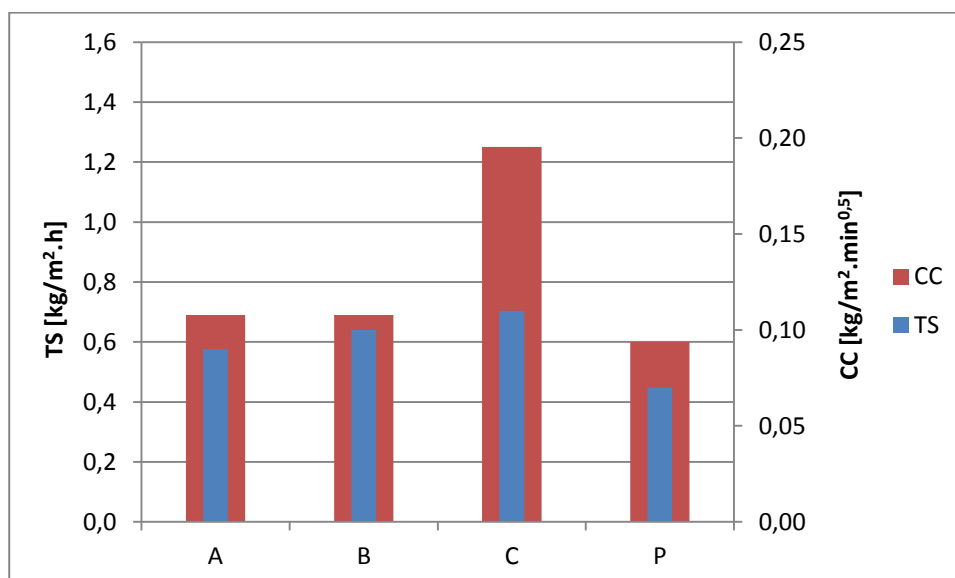


Figura 4.4 – Taxa de secagem e coeficiente de capilaridade (Abreu, 2013)

Analisando os Quadros 4.1 e 4.2 e das Figuras 4.3 e 4.4 verifica-se que o betão C apresenta o valor mais elevado, tanto para o CC, como para a TS. Estes valores obtidos para o betão C indicam que absorve mais água inicialmente, sendo também o que mais rapidamente a liberta. O betão P absorve mais lentamente água tanto nos cilindros, como nas lajetas, mas para o processo de secagem, existem diferenças, ou seja, para os provetes laminares a perda de água é lenta, ao contrário dos provetes cilíndricos em que a perda de água está mais próxima do registado para o betão C. Os betões A e B apresentam comportamentos semelhantes para cilindros e lajetas, relativamente à velocidade de absorção de água, sendo betões que absorvem pouca água inicialmente, mas que em termos de perda

de água, já apresentam diferenças entre os cilindros e lajetas, com estas a perder mais rapidamente água, contrastando com os cilindros.

Nas Figuras 4.3 e 4.4 é relacionado o CC com o coeficiente de absorção de água aos 60 minutos (CAA60) sendo a comparação de valores referente apenas à face rugosa.

Através da análise das Figuras 4.5 e 4.6 verifica-se que o CAA60 é mais elevado para o betão P para cilindros, valor esse que, para as lajetas, pertence ao betão C, estando de acordo com o valor mais elevado de CC. O mesmo não acontece com os provetes cilíndricos do betão P, que tendo o valor mais baixo de CC apresenta o maior de CAA60. Relativamente à mistura C, o seu comportamento mostra-se coerente, apresentando um valor alto de CAA e CC. A mistura A também tem um comportamento coerente, sendo a diferença, entre ambos os parâmetros, maior no caso dos provetes laminares. O betão B para cilindros revela um comportamento incoerente, significando que, irá absorver bastante mais água ao fim de 60 minutos do que realmente acontece, apesar de o CC traduzir o comportamento expectável do material, em relação à absorção de água. Nas lajetas, o betão B já revela um comportamento semelhante ao da mistura A, com valores próximos entre CC e CAA60.

Tendo em conta os parâmetros analisados, pode-se concluir que a maior presença de terra na mistura de betão leva a uma maior absorção de água, para além da sua velocidade ser também mais elevada, analisando VA e CC. O mesmo se passa em termos de secagem, com o betão C a revelar a maior velocidade de perda de água ao longo de todo o processo, através do maior valor de TS e menor de IS.

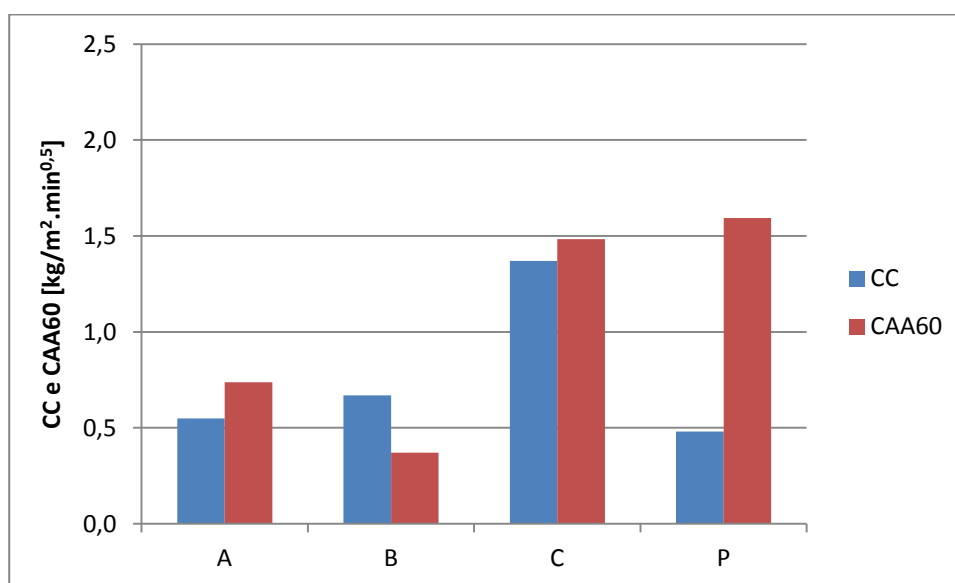


Figura 4.5 – Coeficiente de capilaridade e coeficiente de absorção de água aos 60 minutos

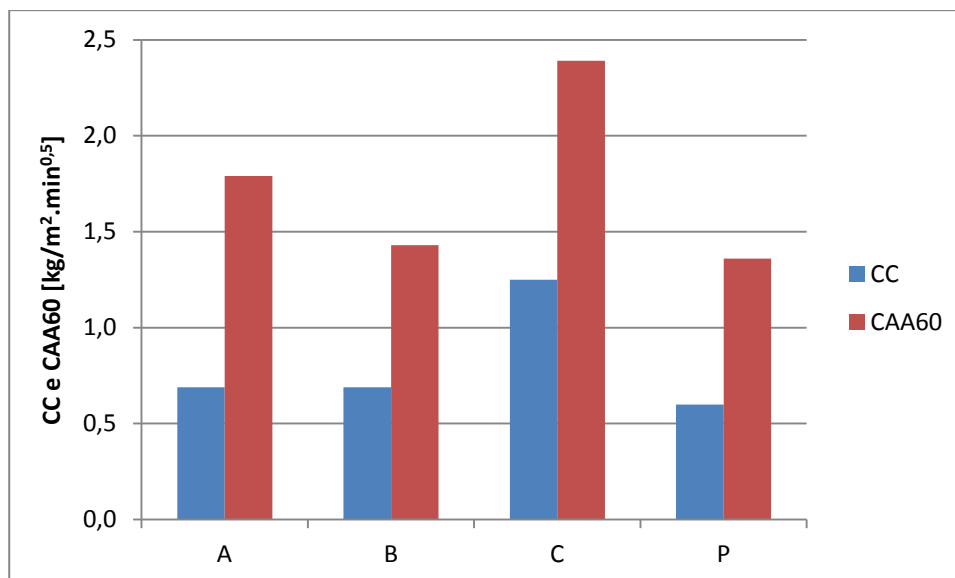


Figura 4.6 - Coeficiente de capilaridade e coeficiente de absorção de água aos 60 minutos (Abreu, 2013)

## 4.2 Características mecânicas

Para além do estudo do comportamento de um betão face à acção da água, existe também o seu comportamento mecânico analisado pela sua resistência como de outros parâmetros, nomeadamente a sua dureza superficial (DS) e o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ). Estas características revelam informação muito relevante da qualidade do material analisado, levando a que sejam feitas melhorias na sua composição e processo de fabrico, sempre com vista à melhoria do material e optimização económica do mesmo.

São então apresentados, nos Quadros 4.3 e 4.4, os valores obtidos na campanha experimental para os parâmetros e resistências mecânicas da presente dissertação e da colega Cátia Abreu (Abreu, 2013), tendo em vista a sua comparação.

Quadro 4.3 – Resultados obtidos para ensaios mecânicos e de resistência

Ensaio		Betão							
		A		B		C		P	
		Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
E <sub>d</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] (ν=0,2)		9236	2293	8166	2748	2258	1064	20433	2234
DS [Escala Vickers]	Base lisa	111,1	14,2	119,9	6,1	71,9	10,0	130,6	7,0
	Base rugosa	119,5	9,6	110,1	10,3	82,7	10,6	140,1	3,8
f <sub>c</sub> [MPa]		16,47	1,38	13,11	0,29	2,38	0,34	33,58	0,82



Quadro 4.4 – Resultados obtidos para ensaios mecânicos e de resistência (Abreu, 2013)

Ensaio		Betão (Valores Cátia Abreu)							
		A		B		C		P	
		Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
E <sub>d</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] (ν=0,2)		8074	630	8725	601	1795	140	17661	604
DS [Escala Vickers]	Face lisa	106,1	5,1	102,4	5,6	36,8	15,1	130,8	9,3
	Face rugosa	99,6	10,6	94,3	9,9	42,0	9,8	124,0	12,9
f <sub>c</sub> [MPa]		8,01	1,43	7,05	1,68	2,22	0,40	16,18	2,26

São apresentados, nas Figuras 4.7 e 4.8, a comparação de valores entre o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) e a resistência à compressão uniaxial ( $f_c$ ).

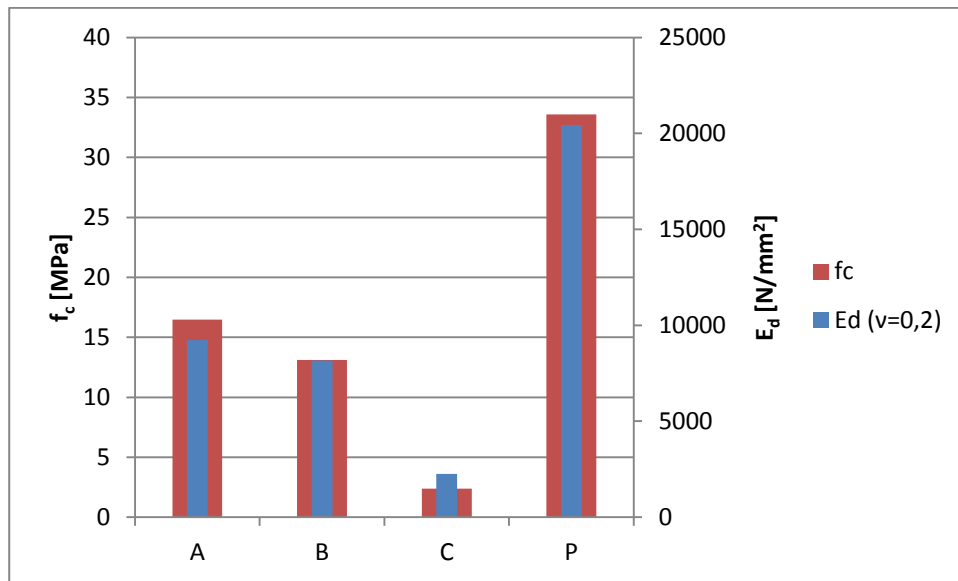


Figura 4.7 – Resistência à compressão uniaxial e módulo de elasticidade dinâmico

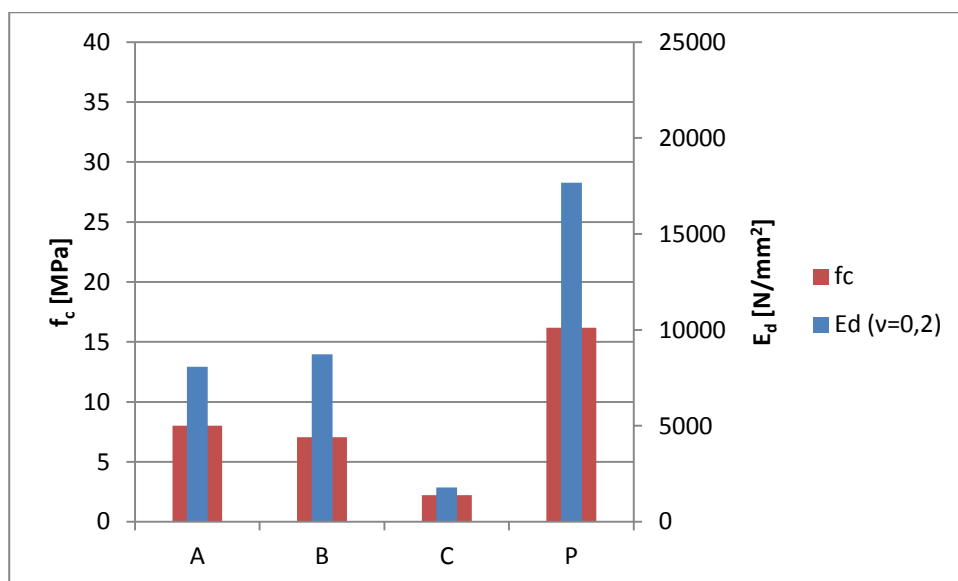


Figura 4.8 - Resistência à compressão uniaxial e módulo de elasticidade dinâmico (Abreu, 2013)

Pelas Figuras 4.7 e 4.8 conseguimos analisar o  $E_d$ , com o maior valor a pertencer ao betão P com um  $E_d$  de aproximadamente o dobro do atingido pelo betão A para cilindros e B para lajetas. A mistura C apresenta o valor mais baixo de todas elas, sendo o seu valor aproximadamente seis vezes menor que o atingido pelo B nos cilindros e o A nas lajetas.

A resistência à compressão uniaxial ( $f_c$ ) é maior para o betão P, novamente o dobro do valor em relação ao mais resistente dos betões com terra, neste caso o A, tanto para os cilindros, como para as lajetas. O betão C apresenta o valor mais baixo de resistência, sendo o seu valor de 33,3% do atingido pelo betão B e de 12,5% do betão P.

Nas Figuras 4.9 e 4.10 são apresentados os valores da dureza superficial (DS) da face lisa e da rugosa, obtidos através do ensaio do esclerómetro pendular, relacionado com resistência à compressão uniaxial.

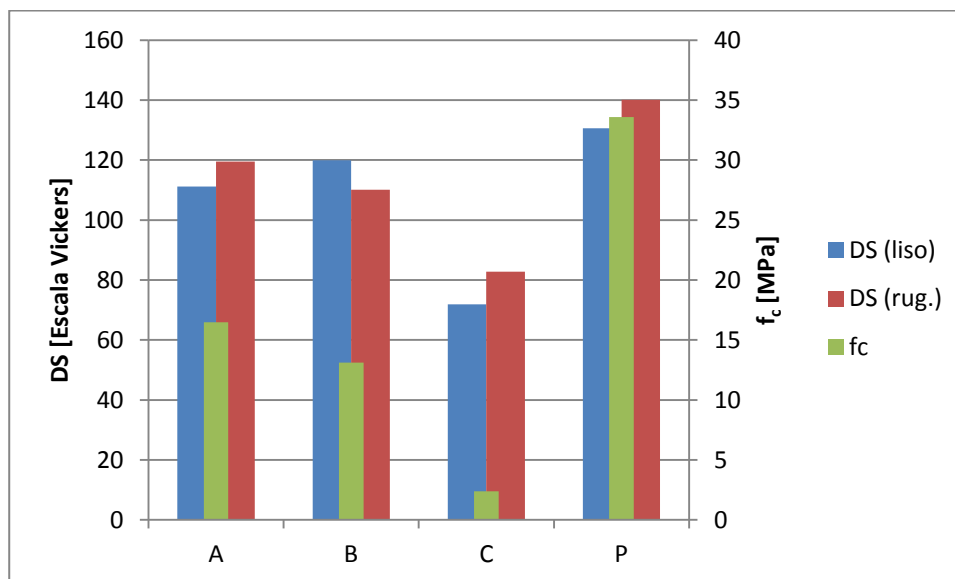


Figura 4.9 – Dureza superficial e resistência à compressão uniaxial

Das Figuras 4.9 e 4.10 conclui-se que o valor mais elevado de resistência pertence ao betão P para os dois tipos de provetes. Nos betões com terra, o A apresenta a maior resistência, seguido do B com valor semelhante, pertencendo ao C a resistência mais baixa. Como já foi referido na campanha experimental, a dureza superficial do material exibe a tendência que o material tem em relação à sua resistência, sendo um indicador da mesma. Assim, os valores de DS medidos, tanto na face lisa como, na rugosa mostram os resultados obtidos para as suas resistências, sendo todos eles coerentes.

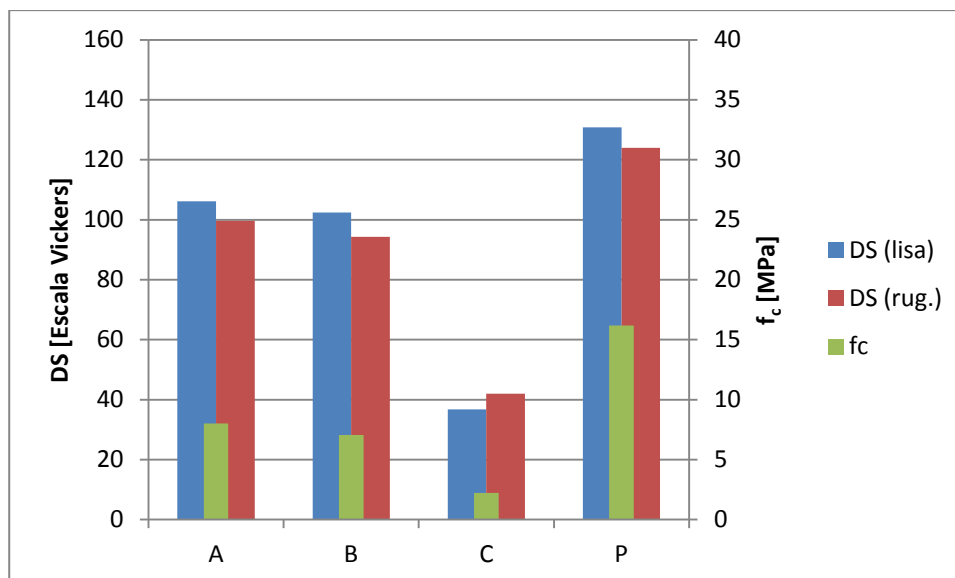


Figura 4.10 – Dureza superficial e resistência à compressão uniaxial (Abreu, 2013)



## 5. Conclusões e desenvolvimentos futuros

### 5.1. Conclusões finais

Com o objectivo de aprofundar os conhecimentos sobre o betão com terra, esta dissertação está envolvida no projecto inserido no programa do QREN com a denominação de PT QREN/21586/2011 – Parede eco-estrutural, desenvolvido em parceria entre a empresa ESLAM e a FCT/UNL com vista à aplicação de painéis modulares em habitação de pequeno porte em países com grandes necessidades habitacionais. A presente dissertação aborda o estudo de provetes cilíndricos de betão com terra, sendo parte do agregado fino substituído por terra, através da alteração do traço ligante:agregado. Com as alterações do traço agregado:terra, é comparado com provetes de betão de agregado corrente, funcionando como padrão. Para a caracterização do material inclui-se uma introdução teórica sobre os materiais constituintes do betão com terra, a sua evolução e enquadramento e, mais importante, o estudo do seu comportamento, características e campo de aplicação. Para isso foram apresentadas as soluções construtivas mais utilizadas com terra, em todas as suas variantes, do betão, solo-cimento, assim como de betão com terra. Através da campanha experimental, onde foram descritos detalhadamente os ensaios efectuados, as condições em que foram realizados e os resultados obtidos, foi possível conhecer e compreender melhor o material, quer se tratasse dos ensaios não-destrutivos, da acção da água ou de resistências mecânicas. Todos os ensaios realizados recriaram, em laboratório as condições ambientais a que o material estará sujeito durante a sua vida útil. Os ensaios efectuados foram sempre acompanhados de normalização europeia e americana em vigor, tendo que ser adaptada para o betão com terra devido à ausência de normas para este material.

Através dos valores obtidos para o comportamento térmico, foi possível concluir que o betão C (1:6:4 [cimento:terra:brita]) apresenta o melhor resultado, confirmando que a terra é um bom isolamento térmico. Os betões A (1:3:1 [cimento:terra:brita]) e B (1:3:2 [cimento:terra:brita]) apresentam valores semelhantes, sendo a diferença para o betão C na ordem dos 15%. O betão P (1:2:2 [cimento:areia:brita]) apresenta assim o pior comportamento, atingindo aproximadamente 70%, mais que o obtido para o betão C.

É importante referir o facto do ensaio de esclerómetro nos proporcionar de forma qualitativa a resistência dos betões, sendo assim um ensaio não destrutivo importante e que deve ser aplicado para o estudo deste tipo de material. A dureza superficial obtida neste ensaio permite concluir que o betão padrão é o mais resistente de todos os betões estudados, com uma diferença de aproximadamente 10% e 20% para os betões A e B, sendo a diferença maior entre a base lisa do B e a rugosa do A, em comparação com o P. Relativamente ao ensaio ser realizado na face lisa ou na rugosa, tendo em conta a variação de 10% entre as duas superfícies e o desvio-padrão mais elevado nos betões com terra, não terá muita relevância a superfície ensaiada.

No que à acção da água diz respeito, devemos dividir o comportamento do betão em duas fases, a de absorção por capilaridade e sob baixa pressão através dos tubos de Karsten e a secagem por evaporação. A absorção de água foi definida através do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico para o ensaio de capilaridade, assim como o coeficiente de absorção de água aos 60 minutos para os tubos de Karsten. O valor assintótico indica o volume de água absorvida durante o ensaio de capilaridade e, para essa grandeza, o betão C foi o que obteve o valor mais elevado, tendo os betões A e B obtido valores semelhantes, não havendo assim diferenças significativas entre a absorção de água e a proporção de terra presente na mistura. Relativamente ao CC, o betão C apresenta o valor mais alto, sendo a sua diferença o dobro da obtida para o B e o triplo para o betão P. Estes valores são compatíveis com o coeficiente de absorção de água aos 60 minutos obtidos através dos tubos de Karsten, excepção feita ao betão P, podendo esse facto estar relacionado com o terem sido usados provetes inteiros, em vez de cortados como aconteceu com os de betão com terra. Já o betão B também apresenta um valor de CC mais alto que o A e P e, no entanto, o CAA60 é o mais baixo de todos.

Conclui-se assim que, em termos de comportamento face à acção da água, o betão B apresenta o melhor comportamento dentro dos betões com terra, sendo o betão P o melhor entre os quatro estudados, com o seu valor a ser menor que o do B, na ordem dos 50%.

Para a perda de água por evaporação, o comportamento dos betões foi avaliado através do índice e da taxa de secagem. O índice de secagem traduz a facilidade na perda de água, reflectindo-se no comportamento do material a longo prazo, sendo o betão C a apresentar o menor valor, logo o melhor comportamento. O betão A é o que apresenta pior comportamento de todos, sendo o seu valor semelhante ao do B. Já o betão P acaba por apresentar um bom resultado, posicionando-se entre o C e o B. No que à taxa de secagem se refere, que reflecte a velocidade inicial de perda de água, o betão C apresenta o valor mais elevado, sendo o melhor em termos de comportamento. Os betões A e B têm valores bastante próximos e mais baixos que o betão P.

Em termos de resistências mecânicas, tanto para a compressão diametral, como para a uniaxial, o betão A apresenta o valor mais elevado dos betões com terra. O betão B tem um valor muito próximo do A para o ensaio de compressão diametral antes do contacto com a água, aumentando a diferença após o contacto com a água, com o betão B a perder resistência. O betão C tem valores muito inferiores aos restantes com aproximadamente 16% do valor atingido pelo A. Relativamente ao ensaio de compressão uniaxial, o betão P regista o valor mais elevado, com o dobro do valor atingido pelo A. O betão B regista valores inferiores aos do A, com o C a atingir valores de aproximadamente 10% quando comparado com o A.

Após a finalização deste estudo e analisando globalmente todos os parâmetros, o betão A aparenta ser o melhor dos betões com terra analisados. No entanto, conjugando os resultados obtidos na presente dissertação com os da colega Cátia Abreu (Abreu, 2013), conclui-se que os betões A e B têm características semelhantes, e apresentam bons valores de resistência para o fim a que se destinam,

mesmo que sejam mais baixos que o apresentado pelo betão padrão. Perante estes resultados conclui-se que são uma boa alternativa às soluções tradicionais em terra.

### 5.2. Desenvolvimentos Futuros

Após a conclusão deste estudo sobre provetes de betão com terra, existe a necessidade de se continuar o estudo sobre este tipo de material. Como tal, é importante que se aprofunde o estudo sobre os seguintes pontos:

- Optimizar as características do betão com terra, através do estudo de diferentes tipos de terra;
- Melhorar o processo de mistura na fabricação do betão com terra, para se obter uma mistura mais homogénea;
- Obtenção experimental do coeficiente de Poisson do betão com terra;
- Determinar a melhor mistura, tanto de ligante:agregado, como de brita:terra, por forma a se obter o melhor comportamento físico, mecânico e face à acção à água, mantendo o baixo custo de produção e a sustentabilidade do material.





## Bibliografia

- Abreu, C. (2013). *Caracterização de betão com terra através de provetes laminares*. Caparica: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - FCT-UNL.
- ACI (1990). *ACI Committee 230(1990) - Report on Soil Cement*, Michigan.
- Appleton, J. & Costa, A. n.d. *Estruturas de Betão I, Sebenta*. Lisboa: IST.
- Ata, O. & Adesanya, D. (2007). The Effects of applied stress on the modulus of elasticity and modulus deformability of laterized concrete. *Surveying and Build Environment*, Vol.18- Nº1, 27-34.
- Avrami, E., Guillaud, H. & Hardy, M. (2008). *Terra Literature Review: An Overview of Research in Earthen Architecture Conservation*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute.
- Azuar Ruiz, R. (1995). *Las tecnicas constructivas en al-Andalus: el origen de la silleria y del hormigon de tapial*. Najera, Logrono, Instituto de Estudios Riojanos.
- Brito, V., Gonçalves, T. & Faria, P. (2011). Coatings applied on damp buildings substrates: performance and influence on moisture transport. *Journal of Coatings Technology and Research*, 8(4), 513-525.
- Castro, J., (1998). *Estudo Experimental da Secagem do betão Celular*, Porto: Dissertação de Mestrado, FEUP.
- CEN, (2002). *EN 1015-18 :Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*, s.l.: European Committee for Standardization (CEN).
- CEN, (2009). *EN 15801 Conservation of cultural property. Test Methods. Determination of water absorption coefficient due to capillarity*, Brussels.
- Chazelles, C. (1993). *Savoir-faire indigenes et influences coloniales dans l'architectures de terre antique de l'extreme-Occident (Afrique du Nord, Espagne, France Meridionale)*. Silves, Portugal, Direcção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais.
- CNR/ICR, (1991). *Normal 29/88 - Misura dell'indice di asciugamento (drying index)*. Roma: s.n.
- Coutinho, A., (1988). *Fabrico e Propriedades do Betão (2ª Ed., Vol.I)*. Lisboa: LNEC.
- Coutinho, A. e Gonçalves, A., (1994). *Fabrico e Propriedades do Betão, Vol. III*. Lisboa: LNEC.
- Coutinho, J. S. (1998). *Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento de Cofragem*, Porto: Dissertação de Doutoramento, FEUP.
- Crawford, G. (1997). *Guide to Nondestructive Testing of Concrete*. Washington: US Department of Transportation.
- Day, K. (2006). *Concrete Mix Design, Quality Control and Specification, 3rd Ed.*. New York, USA: Taylor & Francis.
- Duggal, S. (2008). *Building Materials, 3rd Ed.*. New Dehli: NEW AGE INTERNATIONAL (P) LIMITED, PUBLISHERS.

- Easton, D. (1996). *The rammed earth house*. White River Junction: Chelsea Green Publishing Company.
- Easton, D. (2007). *The Rammed Earth House (revised edition)*. White River Junction, Vermont: Chelsea Green Publishing Company.
- Faria, P., Silva, V., Abreu, C. & Pereira, C. (2013). *CIHEL - Caracterização de betão com terra para aplicação em construção modular prefabricada (cd-rom)*, Lisboa: LNEC.
- FCT/UNL & ESLAM, S. (2012). *Relatório relativo a tarefas executadas durante o primeiro ano - Parede eco-estrutural*, s.l.: s.n.
- Ferreira, C. (1989). *Betão - A idade da Descoberta*. Lisboa: Passado Presente.
- Flores-Colen, I. (2009). *Metodologia de Avaliação do desempenho em serviço de fachadas rebocadas na óptica da manutenção predictiva*, Lisboa: Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil - IST/UTL.
- Graciani Garcia, A. & Tabales Rodriguez, M. A. (2003). *Typological Observations on Tapia Walls in the Area of Seville*. Madrid, Instituto Juan de Herrera.
- Grilo, J. et al. (2014). New Natural Hidraulical Lime mortars - Physical and microstructural properties in different curing conditions. *Construction and Building Materials*, 378-384.
- Hamassaki, L. (1986). *Utilização do ultra-som em concreto*, São Paulo: Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- Hendrickx, R. (2012). Using the Karsten tube to estimate water transport parameters of porous building materials. *Material and Structures*, 22, 1309-1320.
- Houben, H. & Guillaud, H. (1989). *Traité de Construction en Terre*. Marseille: Editions Parenthèses.
- Houben, H. & Guillaud, H. (1994). *Earthen Architecture: A comprehensive guide..* London, UK: Intermediate Technology Development Group.
- IAEA (2002). *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*. Vienna: s.n.
- IPQ (2003). *NP EN 12390-1: Ensaaios do betão endurecido - forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes*, Caparica: IPQ.
- IPQ (2003). *NP EN 12390-3: Ensaaios do betão endurecido - Resistência à compressão dos provetes de ensaio*, Caparica: IPQ.
- IPQ (2003). *NP EN 12390-6: Ensaaios do betão endurecido - Resistência à tracção por compressão de provetes*, Caparica: IPQ.
- IPQ (2003). *NP EN 12504-2: Ensaaios do betão nas estruturas - Determinação do índice esclerométrico*, Caparica: IPQ.
- IPQ (2007). *NP EN 12504-4: Ensaaios do betão nas estruturas - Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons*, Caparica: IPQ.
- Jaquin, P. A. (2008). *Analysis of historic rammed earth construction, Durham theses*. s.l.: Durham University.

- Jaquin, P., Augarde, C. & Gerrard, C. (2007a). *Historic rammed earth structures in Spain, construction techniques and a preliminary classification*. Bangalore, India, Interline Publishing.
- Keable, R., Walker, P. & Martin, J. a. M. V. (2005). *Rammed Earth, Design and Construction Guidelines*. Watford: BRE Bookshop.
- Krischer, O. & Kroll, K. (1963). *Téchnique du Séchage, Centre Technique des Industries Aérauliques et Thermiques (CETIAT)*, Berlin: Traduction Springer- Verlag.
- Lasis, F. & Osunade, J. (1990). *Laterized Concrete Masonry as an alternative in building and rural infrastructures*. Ghana, Seam 2, 151-161.
- Lea, F. (2004). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4th Edition*. Oxford, UK: Elsevier Science and Technology Books.
- Leslie, J. & Cheeseman, W. (1949). An ultrasonic method of studying deterioration and cracking in concrete structures. *Journal of the American Concrete Institute* 21(1), 17-36.
- LNEC (2002). *Revestimento de Paredes. Ensaio de absorção de água sob baixa pressão*. Lisboa: LNEC.
- LNEC (2002). *Revestimento de Paredes - Ensaio de absorção de água sob baixa pressão, FE Pa. 39.1*, Lisboa: LNEC.
- Long, B., Kurtz, H. & Sandenaw, T. (1945). An instrument and a technic for field determination of elasticity, and flexural strenght of concrete (pavements). *Journal of the American Concrete Institute*, 217-231.
- Malhotra, V. & Carino, N. (2004). *CRC Handbook on non destructive testing of concrete, 2nd Ed.*. Boston: CRC Press.
- Margarido, F. & Gonçalves, M. C. (2012). *Ciência e Engenharia de Materiais de Construção*. Lisboa: IST Press.
- Minke, G. (2006). *Building with Earth*. Boston: Birkhäuser.
- Morel, J., Mesbah, A., Oggero, M. & Walker, P. (2000). Building houses with local material: means to drastically reduce the environmental impact of construction. *Building and Environment*, 1119-1126.
- Morton, T. (2008). *Earth Masonry: Design and construction guidelines*. Berkshire: Construction Research Communications Limited.
- Naik, T. & Malhotra, V. (1991). The ultrasonic pulse velocity method. In: *CRC Handbook on non destructive testing of concrete, 1ªEd.*. Boston: CRC Press.
- Nepomuceno, M. (1999). *Ensaaios não destrutivos em betão: Trabalho de Síntese*, Covilhã: Universidade da Beira Interior.
- Neves, C. (2005). *O uso de solo cimento em edificações: A experiência de CEPED*, Bahia: s.n.
- Neville, A. & Brooks, J. (2010). *Concrete Technology, 2nd Edition*. London, United Kingdom: Prentice Hall.

- Pacheco-Torgal, F. & Jalabi, S. (2011). Earth Construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials*, p. Elsevier.
- PCA (1971). *Soil Cement Laboratory Handbook*. Illinois: Portland Cement Association.
- PCA (2005). *Soil cement for comercial sites: The low cost alternative for heavy duty industrial pavements*, Illinois: Portland Cement Association.
- PROCEQ (2007). *Portable Concrete Testing Instruments For Non Destructive Site Investigation*, s.l.: s.n.
- RILEM (1980). *Materials and Structures - Research and Testing, Vol.13*, Paris: RILEM.
- Swenarton, M. (2003). *Rammed earth revival: technological innovation and government policy in Britain, 1905-1925.*, s.l.: Construction History Society.
- Tibbets, J. (1989). *The Earthbuilders' Encyclopaedia, The Master Alphabetical Reference for Adobe and Rammed Earth*. Peralta: New Mexico Southwest Solaradobe School.
- Reddy, B. e Jagadish, K. (2001). Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. *Energy and Buildings*, 35(2), 129-137.
- Reddy, B. e Gupta, A. (2004). Characteristics of soil-cement blocks using highly sandy. *Material and Structures* 38, 651-658.
- Reddy, B. e Kumar, P. (2009). Embodied energy in cement stabilised ramed earth walls. *Energy and Buildings*, 42(3), 380-385.
- Viñuales, G. (2008). Tecnología y construcción con tierra. *Apuntes*, Vol.20-Nº2, 220-231.
- Walker, P. (1995). Strenght, durability and shronkage characteristics of cement stabilised soil blocks. *Cement and Concrete Composites*, 301-310.
- Whitehurst, E. (1966). *Evaluation of Concrete Properties from Sonic Tests, Monograph No.2*. Detroit: American Concrete Institute.
- Wikipédia. (2013). Laterite. Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Laterita>

## **ANEXO**

### **RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS**



Quadro A.1 – Resultados individuais das velocidades do ensaio de ultra-sons

Pontos leitura	Velocidade (m/s)											
	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	C-1	C-2	C-3	P-1	P-2	P-3
A'-1	2671	2649	2649	2589	2517	2492	1295	1135	1388	3656	3494	3662
A'-2	2217	2531	2564	2628	2442	2118	909	974	1264	3560	3549	3640
A'-3	1293	2087	2310	2267	2207	1370	760	972	1120	3034	3019	3061
B'-1	2514	2737	2603	2133	502	2352	767	718	1466	3632	3526	3414
B'-2	2511	2674	2600	2646	2504	2350	1070	1350	1681	3591	3527	3499
B'-3	2427	2453	2675	2089	2104	2095	1116	1181	1479	3447	3438	3507
C'-1	2306	1670	2323	1515	1808	1574	746	780	1162	3113	3137	2995
C'-2	2689	2606	2566	2697	2503	2132	1339	1147	1393	3449	3544	3454
C'-3	2607	2496	2647	2722	2595	2532	802	1342	1750	3451	3497	3373
F-6	2633	2573	2671	2639	2592	1987	1165	1391	1583	3464	3586	3502
F-7	2570	2526	2594	2527	2374	1972	926	879	1476	3591	3577	3589
F-8	2305	2054	2292	2014	2415	1649	848	727	1202	3053	3523	3508
G-6	2569	360	2610	2330	2117	1105	794	1011	1304	3462	3476	3476
G-7	2589	2558	2532	2609	2485	2040	1222	1233	1694	3475	3488	3497
G-8	2681	2443	2586	2407	2641	1933	1018	753	1432	3436	3334	3419
H-6	1695	1854	2251	2210	2020	1301	893	819	1201	3024	3044	3049
H-7	2628	2276	2619	2118	1754	2001	1249	1147	1376	3467	3537	3478
H-8	2646	2612	2624	2663	2621	2450	1272	1148	1587	3378	3448	3470
T-S	2352	1992	2717	2350	2616	1858	986	780	1547	3759	3710	3569

Quadro A.2 – Resultados individuais de condutibilidade térmica

$\lambda$ [W/m*K]				
Provete	1	2	3	Média
A-1	1,42	1,40	1,44	1,42
A-2	1,41	1,38	1,45	1,41
A-3	1,37	1,34	1,40	1,37
B-1	1,45	1,43	1,47	1,45
B-2	1,37	1,36	1,39	1,37
B-3	1,47	1,45	1,49	1,47
C-1	1,42	1,41	1,44	1,42
C-2	1,15	1,13	1,17	1,15
C-3	1,22	1,21	1,23	1,22
P-1	2,23	2,19	2,21	2,21
P-2	1,98	2,03	2,01	2,01
P-3	2,19	2,13	2,08	2,13



Quadro A.3 – Resultados individuais do ensaio de esclerómetro

<b>A-1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Lado rugoso	73	83	91	94	95	96	95	90	97	97
Lado rugoso	85	102	103	107	104	108	110	108	110	110
Lado liso	103	123	128	130	132	132	133	133	128	132
Lado liso	97	118	112	123	127	126	125	127	128	129

<b>A-2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Lado rugoso	97	106	120	121	116	120	122	122	122	120
Lado rugoso	81	95	101	103	105	105	107	107	95	97
Lado liso	107	104	104	111	115	112	108	115	113	119
Lado liso	98	120	124	125	127	129	130	129	130	130

<b>A-3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Lado rugoso	108	127	131	132	132	133	133	133	133	/
Lado rugoso	94	115	120	122	122	118	117	117	120	118
Lado liso	92	118	122	97	99	103	120	117	123	121
Lado liso	95	106	112	111	110	113	112	116	114	111

<b>B-1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Lado rugoso	90	111	116	117	118	119	120	120	119	120
Lado rugoso	94	120	127	129	130	131	131	131	131	/
Lado liso	94	98	107	108	109	107	108	104	119	119
Lado liso	85	95	101	104	111	109	104	112	100	93

<b>B-2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Lado rugoso	95	117	118	97	99	121	123	114	121	122
Lado rugoso	90	115	115	120	119	122	118	124	125	114
Lado liso	85	107	113	115	114	113	112	112	110	85
Lado liso	85	95	101	104	111	109	104	112	100	93

<b>B-3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Lado rugoso	76	110	121	125	126	122	115	123	123	124
Lado rugoso	89	114	117	118	117	116	116	114	114	113
Lado liso	88	109	112	116	121	119	118	119	118	118
Lado liso	97	120	124	124	123	126	124	124	126	125

 - Valores desprezados

Quadro A.3 (cont.) – Resultados individuais do ensaio de esclerómetro

C-1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lado rugoso	44	60	63	62	60	45	54	54	53	53
Lado rugoso	44	66	75	78	78	76	75	72	71	68
Lado liso	54	75	85	90	92	93	93	93	92	92
Lado liso	50	67	75	78	80	84	88	82	88	83

C-2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lado rugoso	38	54	62	64	65	65	64	63	63	62
Lado rugoso	44	64	74	80	83	85	85	85	85	/
Lado liso	47	66	76	82	86	88	90	91	91	92
Lado liso	57	80	89	91	96	97	98	93	93	98

C-3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lado rugoso	46	65	73	77	77	81	82	78	78	80
Lado rugoso	52	70	79	83	84	84	83	82	81	78
Lado liso	42	57	65	68	69	63	68	70	69	69
Lado liso	48	65	74	80	85	87	88	85	88	90

P-1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lado rugoso	103	95	124	130	124	133	134	136	136	136
Lado rugoso	77	114	123	124	128	131	128	132	130	122
Lado liso	104	133	136	138	140	139	141	143	143	144
Lado liso	121	138	138	138	140	139	138	138	139	139

P-2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lado rugoso	102	128	134	135	136	137	138	139	140	139
Lado rugoso	118	124	126	128	129	130	130	131	131	126
Lado liso	122	137	140	141	142	142	142	142	/	/
Lado liso	119	136	140	141	139	142	142	142	139	141

P-3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lado rugoso	46	65	73	77	77	81	82	78	78	80
Lado rugoso	52	70	79	83	84	84	83	82	81	78
Lado liso	42	57	65	68	69	63	68	70	69	69
Lado liso	48	65	74	80	85	87	88	85	88	90

 - Valores desprezados

Quadro A.4 – Resultados individuais do ensaio dos tubos de Karsten dos betões A e B

Hora	Volume água absorvido (cm <sup>3</sup> )					
	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3
0'	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5'	0,3	0,4	0,7	0,3	0,2	0,3
10'	0,6	0,7	1,1	0,4	0,4	0,5
15'	0,9	0,9	1,6	0,5	0,5	0,7
30'	1,7	1,4	2,9	0,6	0,7	1,2
60'	3,0	2,3	4,0	0,8	1,1	2,1
			5,1			

Quadro A.5 – Resultados individuais do ensaio dos tubos de Karsten dos betões C e P

Hora	Volume água absorvido (cm <sup>3</sup> )					
	C-1	C-2	C-3	P-1	P-2	P-3
0'	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5'	0,8	1,6	0,9	0,9	1,1	0,8
10'	1,4	2,5	1,4	1,8	1,4	1,8
15'	1,8	3,2	1,9	1,9	2,4	2,0
30'	3,0	4,0	3,2	3,4	3,8	3,2
60'	4,0	5,2	4,0	4,0	4,0	4,0
	4,5	6,6	4,9	5,8	6,0	5,3

Quadro A.6 – Resultados individuais do ensaio de capilaridade betão A

Quantidade de água absorvida [kg/m <sup>2</sup> ]						
Tempo	Identificação dos provetes					
[min <sup>0,5</sup> ]	A-1 L	A-1 M	A-2 L	A-2 M	A-3 L	A-3 M
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,24	2,27	2,39	2,24	1,83	1,78	1,46
3,16	2,98	3,15	3,02	2,47	2,35	1,87
3,87	3,36	3,62	3,34	2,84	2,69	2,11
5,48	4,20	4,69	4,11	3,84	3,36	3,00
7,75	5,30	6,13	5,29	5,14	4,29	4,18
10,95	7,00	8,31	7,11	7,03	5,78	6,08
13,42	8,23	9,86	8,39	8,42	6,92	7,50
15,49	9,34	11,16	9,59	9,74	7,93	8,79
20,49	11,90	13,94	12,61	12,69	10,47	11,86
37,95	15,94	15,65	15,52	15,82	15,21	15,62
53,67	15,98	15,67	15,53	15,90	15,22	15,65

Quadro A.7 – Resultados individuais do ensaio de capilaridade betão B

Quantidade de água absorvida [kg/m <sup>2</sup> ]						
Tempo	Identificação dos provetes					
[min <sup>0,5</sup> ]	B-1 L	B-1 M	B-2 L	B-2 M	B-3 L	B-3 M
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,24	2,13	2,52	2,65	2,95	2,57	2,54
3,16	2,78	3,27	3,41	3,51	3,36	3,32
3,87	3,28	3,81	3,88	4,05	3,97	3,93
5,48	4,18	4,72	4,92	5,13	5,08	5,29
7,75	5,50	6,11	6,23	6,71	6,40	6,86
10,95	7,40	8,27	8,23	9,20	8,49	9,33
13,42	8,81	9,84	9,67	10,88	10,02	11,09
15,49	10,05	11,22	10,97	12,43	11,30	12,55
20,49	13,05	14,22	13,88	15,30	14,19	15,41
37,95	15,17	15,42	14,83	15,78	15,35	16,12
53,67	15,21	15,44	14,85	15,87	15,36	16,21

Quadro A.8 – Resultados individuais do ensaio de capilaridade betão C

Quantidade de água absorvida [kg/m <sup>2</sup> ]						
Tempo	Identificação dos provetes					
[min <sup>0,5</sup> ]	C-1 L	C-1 M	C-2 L	C-2 M	C-3 L	C-3 M
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,24	4,06	4,89	2,43	4,89	3,79	4,72
3,16	4,93	6,70	3,37	6,44	5,09	6,45
3,87	5,74	8,02	4,14	7,87	6,16	7,65
5,48	7,75	10,62	5,86	10,41	8,41	10,17
7,75	10,58	13,62	8,26	13,55	11,13	12,95
10,95	15,11	17,67	12,14	17,01	15,09	17,07
13,42	17,29	17,94	15,34	17,77	17,47	18,13
15,49	17,54	18,06	17,54	17,88	17,73	18,27
20,49	17,59	18,01	17,88	17,89	17,82	18,35
37,95	17,76	18,09	18,05	18,13	17,93	18,49
53,67	17,84	18,16	18,19	18,28	18,07	18,74

Quadro A.9 – Resultados individuais do ensaio de capilaridade betão P

Quantidade de água absorvida [kg/m <sup>2</sup> ]						
Tempo	Identificação dos provetes					
[min <sup>0,5</sup> ]	P-1 L	P-1 M	P-2 L	P-2 M	P-3 L	P-3 M
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,24	1,50	1,80	1,75	1,65	1,62	1,78
3,16	1,94	2,20	2,14	2,09	2,05	2,25
3,87	2,25	2,57	2,57	2,42	2,38	2,69
5,48	3,02	3,33	3,41	3,30	3,15	3,54
7,75	4,07	4,27	4,44	4,31	4,12	4,66
10,95	5,22	5,51	5,67	5,66	5,27	6,08
13,42	6,14	6,60	6,74	6,75	6,34	7,32
15,49	6,94	7,51	7,58	7,66	7,14	8,28
20,49	8,61	9,23	9,27	9,48	8,82	9,98
37,95	10,65	10,64	10,98	10,78	10,64	11,13
53,67	10,85	10,83	11,19	10,90	10,77	11,31

Quadro A.10 – Resultados individuais do ensaio de secagem do betão A

Quantidade de água perdida [kg/m <sup>2</sup> ]						
Tempo (h)	A1-L	A1-M	A2-L	A2-M	A3-L	A3-M
0	21,69	22,01	21,83	22,08	21,97	24,40
1	21,44	21,81	21,62	21,88	21,80	24,23
2	21,29	21,68	21,47	21,80	21,72	24,15
3	21,27	21,60	21,36	21,69	21,66	24,05
4	21,20	21,52	21,30	21,65	21,60	23,98
5	21,19	21,45	21,19	21,57	21,53	23,92
6	20,98	21,35	21,10	21,46	21,46	23,83
24	18,83	18,76	18,19	19,45	19,30	21,55
48	17,58	17,45	16,84	18,44	18,15	20,36
144	13,87	14,12	13,12	15,27	14,85	17,01
168	13,20	13,45	12,43	14,58	14,14	16,26
192	12,66	12,85	11,85	13,95	13,51	15,64
216	12,17	12,34	11,36	13,41	12,96	15,09
240	11,70	11,88	10,93	12,93	12,51	14,62
312	10,81	11,07	10,10	11,99	11,66	13,72
336	10,56	10,81	9,86	11,70	11,37	13,44
360	10,26	10,53	9,58	11,40	11,09	13,12
384	10,01	10,29	9,36	11,15	10,86	12,85
408	9,77	10,06	9,16	10,92	10,61	12,61
432	8,91	9,14	8,25	9,99	9,65	11,55
552	8,22	8,37	7,56	9,28	8,92	10,78
672	7,98	8,16	7,38	9,04	8,69	10,53
720	7,86	8,02	7,29	8,92	8,57	10,40
744	7,77	7,92	7,18	8,79	8,45	10,28
768	7,48	7,63	6,94	8,52	8,16	9,97
840	7,39	7,53	6,84	8,41	8,05	9,87
864	7,33	7,46	6,80	8,34	7,97	9,80
888	7,27	7,38	6,76	8,27	7,92	9,72
912	7,19	7,30	6,70	8,18	7,84	9,63
936	6,97	7,04	6,48	7,94	7,59	9,39
1008	6,92	6,98	6,42	7,71	7,50	9,31
1032	6,86	6,92	6,37	7,79	7,44	9,24
1080	6,76	6,81	6,29	7,66	7,34	9,14
1152	6,61	6,62	6,15	7,49	7,18	8,95
1224	6,52	6,53	6,06	7,35	7,06	8,84

Quadro A.11 – Resultados individuais do ensaio de secagem do betão B

Quantidade de água perdida [kg/m <sup>2</sup> ]						
Tempo (h)	B1-L	B1-M	B2-L	B2-M	B3-L	B3-M
0	18,87	19,24	19,42	19,40	18,67	19,18
1	18,69	19,03	19,23	19,18	18,47	18,90
2	18,61	18,95	19,07	19,01	18,35	18,76
3	18,51	18,82	18,94	18,88	18,18	18,56
4	18,43	18,75	18,84	18,78	18,09	18,49
5	18,35	18,68	18,76	18,69	18,01	18,38
6	18,30	18,60	18,68	18,60	17,94	18,30
24	16,39	16,81	16,53	15,84	15,07	15,41
48	15,35	15,79	15,38	14,52	13,71	14,03
144	11,98	12,59	11,83	11,00	10,24	10,54
168	11,23	11,72	11,05	10,31	9,57	9,83
192	10,51	10,92	10,37	9,73	9,01	9,21
216	9,88	10,21	9,76	9,17	8,52	8,68
240	9,35	9,59	9,25	8,75	8,14	8,25
312	8,37	8,53	8,32	7,92	7,40	7,44
336	8,07	8,21	8,02	7,67	7,17	7,19
360	7,76	7,58	7,73	7,39	6,92	6,93
384	7,48	7,57	7,48	7,16	6,72	6,74
408	7,25	7,33	7,23	6,93	6,53	6,48
432	6,36	6,36	6,35	6,09	5,78	5,72
552	5,71	5,71	5,73	5,50	5,26	5,17
672	5,51	5,48	5,53	5,30	5,09	4,98
720	5,40	5,39	5,43	5,22	5,02	4,89
744	5,34	5,29	5,37	5,14	4,93	4,81
768	5,11	4,92	5,14	4,89	4,73	4,61
840	5,04	4,96	5,06	4,83	4,66	4,54
864	4,98	4,89	4,98	4,78	4,61	4,49
888	4,93	4,86	4,96	4,73	4,57	4,45
912	4,86	4,78	4,88	4,67	4,52	4,38
936	4,70	4,60	4,70	4,43	4,36	4,24
1008	4,65	4,54	4,66	4,42	4,31	4,18
1032	4,59	4,49	4,61	4,37	4,27	4,13
1080	4,51	4,39	4,53	4,29	4,19	4,08
1152	4,40	4,29	4,41	4,18	4,10	3,98
1224	4,31	4,21	4,33	4,10	4,02	3,90

Quadro A.12 – Resultados individuais do ensaio de secagem do betão C

Quantidade de água perdida [kg/m <sup>2</sup> ]						
Tempo (h)	C1-L	C1-M	C2-L	C2-M	C3-L	C3-M
0	19,22	19,18	18,22	18,27	18,07	18,51
1	19,03	18,76	17,85	17,89	17,71	18,03
2	18,91	18,51	17,55	17,59	17,43	17,74
3	18,75	18,26	17,34	17,37	17,25	17,53
4	18,67	18,06	17,21	17,25	17,13	17,37
5	18,55	17,95	17,11	17,16	17,03	17,26
6	18,47	17,85	16,98	17,06	16,92	17,17
24	15,79	16,23	15,26	15,56	15,33	15,56
48	14,30	14,56	13,36	13,97	13,66	13,85
144	9,86	9,37	7,71	8,67	8,63	8,56
168	8,83	8,32	6,70	7,56	7,61	7,54
192	7,90	7,42	5,92	6,60	6,79	6,67
216	7,06	6,69	5,37	5,84	6,15	6,02
240	6,37	5,29	4,26	4,42	4,88	4,76
312	5,09	4,92	3,95	4,04	4,56	4,42
336	4,74	4,55	3,65	3,67	4,24	4,10
360	4,38	4,24	3,41	3,42	3,96	3,81
384	4,09	3,96	3,20	3,19	3,73	3,57
408	3,85	3,01	2,39	2,35	2,85	2,67
528	2,93	2,40	1,85	1,81	2,26	2,07
648	2,36	2,21	1,68	1,64	2,08	1,87
696	2,19	2,12	1,60	1,58	1,99	1,78
720	2,10	2,04	1,52	1,52	1,92	1,70
744	2,04	1,87	1,35	1,34	1,72	1,50
816	1,87	1,81	1,29	1,31	1,66	1,45
840	1,81	1,78	1,26	1,28	1,62	1,40
864	1,79	1,76	1,22	1,26	1,57	1,38
888	1,76	1,71	1,09	1,22	1,52	1,33
912	1,69	1,62	1,05	1,11	1,38	1,20
984	1,59	1,59	1,00	1,10	1,34	1,18
1008	1,56	1,57	0,97	1,08	1,31	1,13
1032	1,54	1,56	0,93	1,08	1,27	1,11
1080	1,52	1,52	0,87	1,03	1,19	1,05
1152	1,48	1,49	0,83	1,01	1,14	1,02
1224	1,43	1,49	0,81	1,00	1,11	1,01



Quadro A.13 – Resultados individuais do ensaio de secagem do betão P

Quantidade de água perdida [kg/m <sup>2</sup> ]						
Tempo (h)	P1-L	P1-M	P2-L	P2-M	P3-L	P3-M
0	10,90	10,74	11,09	10,67	10,52	11,02
1	10,61	10,39	10,86	10,27	10,20	10,72
2	10,38	10,15	10,62	10,04	9,97	10,47
3	10,21	9,99	10,45	9,90	9,87	10,33
4	10,10	9,89	10,35	9,75	9,75	10,20
5	9,99	9,77	10,26	9,66	9,67	10,13
6	9,91	9,67	10,18	9,55	9,59	10,04
24	8,74	8,25	9,17	8,15	8,63	8,75
48	7,93	7,22	8,43	7,16	7,93	7,81
144	6,32	5,36	6,89	5,42	6,45	6,03
168	6,03	5,06	6,61	5,14	6,18	5,75
192	5,78	4,76	6,35	4,89	5,93	5,51
216	5,59	4,58	6,15	4,70	5,74	5,30
240	5,08	4,06	5,63	4,23	5,23	4,78
312	4,91	3,89	5,47	4,06	5,06	4,60
336	4,74	3,75	5,30	3,91	4,90	4,45
360	4,60	3,58	5,15	3,78	4,73	4,28
384	4,46	3,46	5,00	3,67	4,59	4,15
408	3,93	2,97	4,42	3,19	3,98	3,60
528	3,50	2,61	3,95	2,81	3,51	3,22
648	3,35	2,50	3,79	2,70	3,35	3,10
696	3,28	2,41	3,71	2,64	3,28	3,03
720	3,21	2,37	3,65	2,58	3,19	2,96
744	3,04	2,25	3,48	2,43	3,02	2,80
816	2,98	2,19	3,42	2,39	2,97	2,75
840	2,94	2,17	3,36	2,35	2,91	2,71
864	2,90	2,13	3,32	2,30	2,87	2,67
888	2,85	2,08	3,27	2,26	2,82	2,62
912	2,70	1,95	3,11	2,14	2,66	2,48
984	2,65	1,91	3,07	2,10	2,61	2,44
1008	2,62	1,89	3,02	2,06	2,57	2,39
1032	2,54	1,84	2,95	2,01	2,50	2,34
1080	2,45	1,74	2,83	1,93	2,39	2,26
1152	<b>2,37</b>	1,68	2,74	1,86	2,31	2,18
1224	2,31	1,64	2,69	1,81	2,25	2,13

Quadro A.14 – Resultados individuais dos ensaios de compressão diametral

Provete	$f_{ct}$ [MPa]
A-1	0,59
A-2	0,70
A-3	0,81
B-1	0,61
B-2	0,74
B-3	0,73
C-1	0,15
C-2	0,10
C-3	0,08

Quadro A.15 – Resultados individuais dos ensaios de compressão uniaxial para os provetes de 8 e 6 cm

Provete	$f_c$ (MPa)	Provete	$f_c$ (MPa)
A-1-L (CAP)	15,51	A-1	21,45
A-2-L (CAP)	15,84	A-2	22,01
A-3-L (CAP)	18,05	A-3	24,28
B-1-L (CAP)	13,19	B-1	16,47
B-2-L (CAP)	13,35	B-2	13,02
B-3-L (CAP)	12,79	B-3	12,79
C-1-L (CAP)	2,04	C-1	2,60
C-2-L (CAP)	2,72	C-2	3,28
C-3-L (CAP)	2,38	C-3	2,49
P-1-L (CAP)	32,65	P-1	40,91
P-2-L (CAP)	34,24	P-2	45,67
P-3-L (CAP)	33,84	P-3	43,97